

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie civil

**DURABILITÉ DES RÉPARATIONS DE STRUCTURES
EN BÉTON AVEC DES MATÉRIAUX COMPOSITES**

Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées

Yves BEAUDOIN

Sherbrooke (Québec) CANADA

Mars 1999



**National Library
of Canada**

**Acquisitions and
Bibliographic Services**

**395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

**Bibliothèque nationale
du Canada**

**Acquisitions et
services bibliographiques**

**395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-67242-5

Canada

Résumé

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un projet de renforcement de poutres d'un pont à Sainte-Émélie-de-l'Énergie, Québec. L'objectif était de vérifier la durabilité des poutres renforcées à l'aide des matériaux composites. Ces travaux de recherche ont été rendus possibles grâce à la participation de la Direction des structures, Ministère des Transports du Québec et du groupe de recherche ISIS Sherbrooke.

À l'aide d'une chambre environnementale développée et fabriquée à l'Université de Sherbrooke, des lamelles en matériau composite ont été testées à diverses températures. Ces dernières ont été simulées de manière à être les plus représentatives de l'impact du climat canadien sur nos structures. De plus, avec un équipement spécialisé, des lamelles en matériau composite ont été soumises à de fréquents cycles de gel-dégel. Suite à une exposition donnée de température ou de gel-dégel, les dites lamelles ont subi un essai de traction. Ces essais ont permis de vérifier si les propriétés élastiques du composite soit, la contrainte ultime et le module élastique ont eu des modifications après cette exposition. Une analyse statistique des résultats a donc permis de conclure que les propriétés élastiques subissent des baisses substantielles pour des températures relativement élevées.

D'autre part, des matériaux composites ont été collés à une surface de béton pour vérifier la qualité de l'adhérence entre les deux matériaux après avoir été exposé, durant une longue période, à des cycles de mouillage-séchage et de gel-dégel. Dans l'ensemble, ces essais de flexion sur des poutres et d'arrachement sur des blocs ont démontrés que l'interface composite-béton semble conserver son intégrité.

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier tout particulièrement mon directeur, le professeur Pierre Labossière, de m'avoir fait confiance dans ce projet de recherche, pour tous les conseils et les encouragements qu'il m'a conférés tout au long de mes travaux. Je remercie sincèrement mon codirecteur, le professeur Kenneth W. Neale, pour le soutien de même que les conseils donnés. À vous deux, j'adresse mes remerciements pour les expériences professionnelles que vous m'avez fait vivre au cours de ces dernières années au sein du groupe ISIS; ce fut enrichissant.

Pour la réalisation des travaux de laboratoire, je désire souligner l'excellent travail effectué par les techniciens, messieurs Laurent Thibodeau et Clément Reynolds. De même, les précieux conseils émis par messieurs Marc Demers et Laurent Bizindavyi furent très utiles lors des essais, et l'assistance de madame Sandra Martel très appréciée. Je remercie mes collègues Philippe Lamothe, Patrick Lapierre et Alexandre Raïche pour leur agréable collaboration à certains travaux de laboratoire. J'en garde de bons souvenirs. Je cite également le Département de génie mécanique pour le prêt de certains matériels et équipements.

J'aimerais souligner la participation importante du professeur Mark F. Green et de l'assistance remarquable de Luke A. Bisby de l'Université Queen's pour leur collaboration aux essais de gel-dégel.

La réalisation de ce projet a été rendue possible grâce à la contribution financière du Réseau de Centres d'excellence ISIS Canada et du Ministère des Transports du Québec.

Je désire remercier madame Lise Dutrisac pour son temps et ses commentaires relatifs à la présentation de ce mémoire.

Enfin, j'adresse mes derniers remerciements à une personne qui m'a apporté beaucoup au cours de cette maîtrise et envers qui je suis très reconnaissant. Thérèse, je veux te dire merci.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	i
REMERCIEMENTS	ii
TABLE DES MATIÈRES	iii
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES SYMBOLES	xiii
1 INTRODUCTION	1
1.1 L'état des structures de génie civil	2
1.2 Applications des matériaux composites	3
1.3 Objectifs de la recherche	6
2 REVUE DES TRAVAUX DE RECHERCHE SUR LA DURABILITÉ DES COMPOSITES	7
2.1 Introduction	7
2.2 Les composants du matériau composite	8
2.2.1 La matrice	8
2.2.2 Les fibres	10
2.3 Le matériau composite	12
2.3.1 L'environnement humide et l'immersion	13
2.3.2 La température	15
2.4 Les matériaux composites dans les applications de génie civil	16
3 MÉTHODES D'ESSAIS SUR LES LAMELLES COMPOSITES	20
3.1 Généralités sur les essais	20
3.2 La température	21
3.2.1 Description des échantillons	22
3.2.2 Conditionnement des échantillons	23
3.3 Les cycles de gel-dégel	24
3.3.1 Description des échantillons	24
3.3.2 Conditionnement des échantillons	24
4 EFFETS DE LA TEMPÉRATURE ET DU GEL-DÉGEL SUR LES LAMELLES COMPOSITES	31
4.1 Brève analyse des composites unidirectionnels	31
4.2 Éléments d'analyse statistique	33
4.3 Effet de la température	37
4.3.1 Résultats expérimentaux	37

4.3.2	Effet sur la contrainte ultime.....	38
4.3.3	Effet sur le module élastique.....	40
4.4	Effet des cycles de gel-dégel.....	41
4.4.1	Résultats expérimentaux	41
4.4.2	Effet sur la contrainte ultime.....	42
4.4.3	Effet sur le module élastique.....	42
4.5	Conclusions.....	43
5	PROCÉDURES D'ESSAIS SUR L'INTERFACE COMPOSITE-BÉTON	59
5.1	Cycles de mouillage-séchage	60
5.1.1	Description des échantillons.....	60
5.1.2	Installation des matériaux composites.....	61
5.1.3	Exposition.....	64
5.1.4	Essai de flexion sur les poutres	64
5.1.5	Essai d'arrachement sur les blocs.....	65
5.2	Cycles de gel-dégel	66
5.2.1	Description des échantillons.....	66
5.2.2	Installation du matériau composite	67
5.2.3	Exposition.....	67
5.2.4	Essai de flexion sur les poutres	68
5.2.5	Essai d'arrachement sur les blocs.....	68
6	EFFETS DES CYCLES DE MOUILLAGE-SÉCHAGE SUR L'INTERFACE COMPOSITE-BÉTON	79
6.1	Paramètres de l'analyse	79
6.2	Cycles de mouillage-séchage sur les poutres	81
6.2.1	Résultats des essais de flexion	81
6.2.2	Charge ultime	81
6.2.3	Observations sur la fissuration et le mode de rupture	82
6.2.4	Charge-flèche	83
6.2.5	Charge-déformation dans l'acier d'armature	84
6.2.6	Charge-déformation dans le composite.....	84
6.2.7	Moment-déformation dans le composite.....	85
6.2.8	Profil des déformations	86
6.2.9	Évolution de la contrainte d'adhérence.....	87
6.3	Cycles de mouillage-séchage sur les blocs	88
6.3.1	Résultats des essais d'arrachement	88
6.3.2	Charge ultime et observations sur le mode de rupture	89
6.3.3	Charge-déformation dans le composite.....	90
6.3.4	Profil des déformations	91
6.3.5	Évolution de la contrainte d'adhérence.....	91
6.4	Conclusions sur les effets des cycles de mouillage-séchage.....	93

7	EFFETS DES CYCLES DE GEL-DÉGEL SUR L'INTERFACE COMPOSITE-BÉTON	120
7.1	Paramètres de l'analyse.....	120
7.2	Cycles de gel-dégel sur les poutres	121
7.2.1	Résultats des essais de flexion	121
7.2.2	Charge ultime	121
7.2.3	Observations sur la fissuration et le mode de rupture	121
7.2.4	Charge-flèche	122
7.2.5	Charge-déformation dans le composite.....	122
7.2.6	Moment-déformation dans le composite.....	122
7.2.7	Profil des déformations	123
7.2.8	Évolution de la contrainte d'adhérence	123
7.2.9	Position de l'axe neutre	123
7.3	Cycles de gel-dégel sur les blocs.....	124
7.3.1	Résultats des essais d'arrachement	124
7.3.2	Charge ultime et observations sur le mode de rupture	124
7.3.3	Charge-déformation dans le composite.....	124
7.3.4	Profil des déformations	125
7.3.5	Évolution de la contrainte d'adhérence	125
7.4	Conclusions sur les effets des cycles de gel-dégel.....	125
	CONCLUSION GÉNÉRALE	139
	ANNEXE A : Courbes contrainte-déformation non corrigées	142
	ANNEXE B : Complément de l'analyse statistique	164
	ANNEXE C : Résultats complémentaires sur les effets des cycles de mouillage-séchage	176
	ANNEXE D : Résultats complémentaires sur les effets des cycles de gel-dégel	212
	BIBLIOGRAPHIE	239

Liste des figures

Figure 3.1	Lamelle d'essai avec l'ajout des talons.....	25
Figure 3.2	Installation des talons sur les lamelles.....	25
Figure 3.3	Vues du montage expérimental et de l'intérieur de la chambre environnementale.....	26
Figure 3.4	Fabrication du laminé de carbone/époxy	27
Figure 3.5	Fabrication du laminé de verre-E/époxy.....	27
Figure 4.1	Représentation des modes de rupture selon la norme ASTM D3039	48
Figure 4.2	Contrainte ultime du carbone/époxy selon le groupe d'échantillons (température).....	49
Figure 4.3	Contrainte ultime du verre-E/époxy selon le groupe d'échantillons (température).....	50
Figure 4.4	Module élastique du carbone/époxy selon le groupe d'échantillons (température).....	51
Figure 4.5	Module élastique du verre-E/époxy selon le groupe d'échantillons (température).....	52
Figure 4.6	Contrainte ultime du carbone/époxy selon le groupe d'échantillons (cycles de gel-dégel).....	55
Figure 4.7	Contrainte ultime du verre-E/époxy selon le groupe d'échantillons (cycles de gel-dégel).....	56
Figure 4.8	Module élastique du carbone/époxy selon le groupe d'échantillons (cycles de gel-dégel).....	57
Figure 4.9	Module élastique du verre-E/époxy selon le groupe d'échantillons (cycles de gel-dégel).....	58
Figure 5.1	Configuration de l'acier d'armature et détails géométriques.....	69
Figure 5.2	Courbes caractéristiques de l'acier d'armature utilisé.....	69

Figure 5.3	Configuration du renforcement avec le Replark 20 et disposition des jauges	70
Figure 5.4	Configuration du Replark 20 sur un bloc et disposition des jauges.....	70
Figure 5.5	Configuration du renforcement avec la lamelle Carbodur S et disposition des jauges	71
Figure 5.6	Configuration de la lamelle Carbodur S sur un bloc et disposition des jauges	71
Figure 5.7	Configuration du Fibrwrap sur un bloc et disposition des jauges.....	72
Figure 5.8	Montage d'essais sur les poutres après le mouillage-séchage	73
Figure 5.9	Montage d'essais pour les blocs	73
Figure 5.10	Configuration de l'acier d'armature et détails géométriques.....	74
Figure 5.11	Configuration du renforcement avec la lamelle Carbodur S et disposition des jauges	74
Figure 5.12	Montage d'essais sur les poutres après le gel-dégel	75
Figure 6.1	Charge ultime des poutres avec le Replark 20.....	96
Figure 6.2	Charge ultime des poutres avec le Carbodur S	96
Figure 6.3	Mode de rupture typique des poutres renforcées avec le Replark 20	97
Figure 6.4	Réseau de fissuration d'une poutre typique renforcée de Replark 20 (P0-Repla-A).....	98
Figure 6.5	Mode de rupture typique des poutres renforcées avec le Carbodur S.....	98
Figure 6.6	Réseau de fissuration d'une poutre typique renforcée de Carbodur S (P13-Sika-A).....	98
Figure 6.7	Courbes charge-flèche des poutres renforcées de Replark 20	99
Figure 6.8	Courbes charge-flèche des poutres renforcées de Carbodur S.....	100
Figure 6.9	Déformations de l'acier d'armature pour deux poutres renforcées de Replark 20	101

Figure 6.10	Déformations de l'acier d'armature pour deux poutres renforcées de Carbodur S	102
Figure 6.11	Charge appliquée et déformations du Replark 20 pour les poutres de contrôle	103
Figure 6.12	Charge appliquée et déformations du Carbodur S pour les poutres de contrôle	104
Figure 6.13	Moment appliqué et déformations du Replark 20 pour les poutres de contrôle	105
Figure 6.14	Moment appliqué et déformations du Carbodur S pour les poutres de contrôle	106
Figure 6.15	Profil des déformations le long du Replark 20 pour les poutres de contrôle en fonction de la charge appliquée.....	107
Figure 6.16	Profil des déformations le long du Carbodur S pour les poutres de contrôle en fonction de la charge appliquée.....	108
Figure 6.17	Contrainte d'adhérence en fonction du niveau relatif du chargement des poutres de contrôle Replark 20	109
Figure 6.18	Contrainte d'adhérence en fonction du niveau relatif du chargement des poutres de contrôle Carbodur S.....	110
Figure 6.19	Charge ultime des blocs avec le Replark 20	111
Figure 6.20	Charge ultime des blocs avec le Carbodur S	111
Figure 6.21	Charge ultime des blocs avec le Fibrwrap	112
Figure 6.22	Charge appliquée et déformations du Replark 20 pour les blocs de référence.....	113
Figure 6.23	Charge appliquée et déformations du Carbodur S pour les blocs de référence.....	114
Figure 6.24	Charge appliquée et déformations du Fibrwrap pour les blocs de référence.....	115
Figure 6.25	Profil des déformations le long du Replark 20 pour les blocs de référence en fonction de la charge appliquée.....	116
Figure 6.26	Profil des déformations le long du Carbodur S pour les blocs de référence en fonction de la charge appliquée.....	117

Figure 6.27	Contrainte d'adhérence en fonction du niveau relatif du chargement des blocs de référence Replark 20.....	118
Figure 6.28	Contrainte d'adhérence en fonction du niveau relatif du chargement des blocs de référence Carbodur S	119
Figure 7.1	Charge ultime des poutres avec le Carbodur S	128
Figure 7.2	Réseau de fissuration d'une poutre typique renforcée de Carbodur S.....	128
Figure 7.3	Courbes charge-flèche des poutres renforcées de Carbodur S (0 et 50 cycles)	129
Figure 7.4	Courbes charge-flèche des poutres renforcées de Carbodur S (150 et 300 cycles)	130
Figure 7.5	Charge appliquée et déformations du Carbodur S pour les poutres de contrôle	131
Figure 7.6	Moment appliqué et déformations du Carbodur S pour les poutres de contrôle	132
Figure 7.7	Profil des déformations le long du Carbodur S pour les poutres de contrôle en fonction de la charge appliquée.....	133
Figure 7.8	Contrainte d'adhérence en fonction du niveau relatif du chargement des poutres de contrôle Carbodur S.....	134
Figure 7.9	Charge ultime des blocs avec le Carbodur S	135
Figure 7.10	Charge appliquée et déformations du Carbodur S pour les blocs de référence.....	136
Figure 7.11	Profil des déformations le long du Carbodur S pour les blocs de référence en fonction de la charge appliquée.....	137
Figure 7.12	Contrainte d'adhérence en fonction du niveau relatif du chargement des blocs de référence Carbodur S	138

Liste des tableaux

Tableau 2.1	Propriétés typiques des résines	19
Tableau 2.2	Propriétés typiques des fibres	19
Tableau 3.1	Caractéristiques et propriétés de la résine de Mistubishi.....	28
Tableau 3.2	Propriétés des fibres de carbone préimprégnées de Replark 20	28
Tableau 3.3	Caractéristiques et propriétés de la résine Tyfo S.....	29
Tableau 3.4	Propriétés de la fibre de verre-E	29
Tableau 3.5	Propriétés du matériau composite verre-E/époxy (Fibrwrap).....	30
Tableau 4.1	Données typiques pour un test à un seul facteur.....	45
Tableau 4.2	Sommaire de l'analyse de variance pour un seul facteur, modèle à effet fixe	45
Tableau 4.3	Résultats expérimentaux du carbone/époxy à diverses températures	46
Tableau 4.4	Résultats expérimentaux du verre-E/époxy à diverses températures.....	47
Tableau 4.5	Contrainte ultime du carbone/époxy à diverses températures	49
Tableau 4.6	Analyse de variance de la contrainte ultime du carbone/époxy à diverses températures.....	49
Tableau 4.7	Contrainte ultime du verre-E/époxy à diverses températures	50
Tableau 4.8	Analyse de variance de la contrainte ultime du verre-E/époxy à diverses températures.....	50
Tableau 4.9	Module élastique du carbone/époxy à diverses températures.....	51
Tableau 4.10	Analyse de variance du module élastique du carbone/époxy à diverses températures	51
Tableau 4.11	Module élastique du verre-E/époxy à diverses températures	52

Tableau 4.12	Analyse de variance du module élastique du verre-E/époxy à diverses températures.....	52
Tableau 4.13	Résultats expérimentaux du carbone/époxy selon le nombre de cycles de gel-dégel.....	53
Tableau 4.14	Résultats expérimentaux du verre-E/époxy selon le nombre de cycles de gel-dégel.....	54
Tableau 4.15	Contrainte ultime du carbone/époxy après des cycles de gel-dégel	55
Tableau 4.16	Analyse de variance de la contrainte ultime du carbone/époxy après des cycles de gel-dégel.....	55
Tableau 4.17	Contrainte ultime du verre-E/époxy après des cycles de gel-dégel.....	56
Tableau 4.18	Analyse de variance de la contrainte ultime du verre-E/époxy après des cycles de gel-dégel	56
Tableau 4.19	Module élastique du carbone/époxy après des cycles de gel-dégel.....	57
Tableau 4.20	Analyse de variance du module élastique du carbone/époxy après des cycles de gel-dégel.....	57
Tableau 4.21	Module élastique du verre-E/époxy après des cycles de gel-dégel.....	58
Tableau 4.22	Analyse de variance du module élastique du verre-E/époxy après des cycles de gel-dégel.....	58
Tableau 5.1	Caractéristiques de chaque coulée de béton.....	76
Tableau 5.2	Liste des échantillons pour les essais de mouillage-séchage.....	76
Tableau 5.3	Caractéristiques du mortier Sikadur 30.....	77
Tableau 5.4	Propriétés des lamelles Carbodur.....	77
Tableau 5.5	Liste des échantillons pour les essais de gel-dégel	78
Tableau 6.1	Sommaire des résultats des essais de flexion pour les cycles de mouillage-séchage.....	94
Tableau 6.2	Sommaire des résultats des essais d'arrachement pour les cycles de mouillage-séchage.....	95

Tableau 7.1	Sommaire des résultats des essais de flexion pour les cycles de gel-dégel	127
Tableau 7.2	Sommaire des résultats des essais d'arrachement pour les cycles de gel-dégel	127

Liste des symboles

a	nombre de traitements ou de niveaux
A_c, A_f, A_m	aire de composite, des fibres et de la matrice
b_p	largeur de la lamelle composite
d_i	déformation du composite au point i
d_j	déformation du composite au point j
$d\sigma_c, d\sigma_f, d\sigma_m$	variation de la contrainte du composite, des fibres et de la matrice
$d\epsilon$	variation de la déformation
E_c, E_f, E_m	module élastique du composite, des fibres et de la matrice
E_p	module élastique de la lamelle composite
F	force appliquée
F	distribution de référence de la statistique F (<i>Fisher</i>)
F_o	test statistique ($MS_{\text{Traitements}} / MS_E$)
H_o	hypothèse nulle
H_1	hypothèse alternative
L	longueur du joint
LSD	valeur de comparaison (<i>Fisher</i>)
MS_E	moyenne des carrés relative aux erreurs
$MS_{\text{Traitements}}$	moyenne des carrés relative aux traitements
n	nombre d'échantillons testés
N	nombre total des observations ($N = an$)
P_c, P_f, P_m	charge prise par le composite, les fibres et la matrice
SS_E	somme des carrés relative à l'erreur
SS_T	somme totale des carrés
$SS_{\text{Traitements}}$	somme des carrés relative aux traitements
t	distribution de référence de la statistique t (<i>Student</i>)
t_p	épaisseur de la lamelle composite
v_c, v_f, v_m	volume de composite, de fibres et de matrice
V_f, V_m	fraction volumique de fibres et de matrice
y_i	somme des observations pour le i^{e} traitement
\bar{y}_i	moyenne du i^{e} traitement

$y_{..}$	somme totale de l'ensemble des observations
$\bar{y}_{..}$	moyenne de l'ensemble des observations
α	niveau de signification
Δl_{i-j}	distance entre deux jauges consécutives
$\varepsilon_c, \varepsilon_f, \varepsilon_m$	déformation du composite, de fibres et de la matrice
ε_{ij}	composante aléatoire de l'erreur
μ	moyenne de l'ensemble des observations
μ_i	moyenne du i^{e} traitement
$\sigma_c, \sigma_f, \sigma_m$	contrainte du composite, des fibres et de la matrice
σ^2	variance
τ_i	effet du i^{e} traitement
τ_{i-j}	contrainte d'adhérence entre deux jauges
τ_m	contrainte moyenne d'adhérence

Chapitre 1

INTRODUCTION

Depuis quelques années, des chercheurs de par le monde entier s'intéressent à renforcer des structures déficientes à l'aide de matériaux composites, et parallèlement, à préconiser l'emploi de ce nouveau matériau pour de nouvelles infrastructures en génie civil. Le Japon et l'Europe sont les principaux acteurs dans le développement de nouveaux produits en matériau composite et où il est possible d'y retrouver le plus grand nombre d'applications avec cette technologie (ACI, 1996). De même, les États-Unis participent activement au développement des matériaux composites, là où le besoin de maintenir et de renforcer plusieurs structures devenues vulnérables à la suite de nombreux tremblements de terre est apparu.

Au Canada, l'intérêt pour les matériaux composites a débuté par la création d'un Comité technique de la Société canadienne de génie civil (SCGC) en 1989 et s'est poursuivi par la suite avec la formation du Réseau MCAPC du Canada en 1993 (LABOSSIÈRE, 1993). Depuis sa création à l'automne 95, le Réseau de Centres d'excellence ISIS Canada (*Innovations en structures avec systèmes de détection intégrés*) recherche des solutions pour faire face à la crise des infrastructures canadienne et mondiale. Ce réseau national regroupe plusieurs universités à travers le Canada et les chercheurs qui y sont affiliés développent de multiples applications utilisant les matériaux composites et intégrant des fibres optiques pour le monitoring des structures. Avec les matériaux composites, la conquête de nouveaux produits et de nouvelles applications dans les structures de génie civil est maintenant débutée.

1.1 L'état des structures de génie civil

Les ponts en béton armé de l'Amérique du Nord, qui ont été construits dans les années 30 jusqu'aux années 70, sont une préoccupation courante pour leur propriétaire et les ingénieurs responsables. Ces ouvrages d'art démontrent des signes de vieillesse qui sont la conséquence d'une augmentation des charges de transport, de leur exposition aux conditions environnementales auxquelles ils font face durant leur vie utile, et parfois, de certains vices de construction. Pour les régions plus nordiques, l'utilisation de sels fondants et les nombreux cycles de gel-dégel dégradent dramatiquement leurs composantes. De plus, que dire de l'acier d'armature qui occasionne des dommages importants au niveau de la structure à la suite de la corrosion. Dans bien des cas, la corrosion de l'acier d'armature, aggravée par les ions chlorures, engendre des pressions qui provoquent l'éclatement du recouvrement en béton. Par conséquent, inutile de rajouter que la corrosion se poursuivra et même, elle en sera accélérée. Ce même constat est applicable pour toutes les autres structures en béton armé et précontraint dont les garages de stationnement, les tunnels, les murs de soutènement, les quais et même les réservoirs.

Dans un autre ordre d'idées, le changement de vocation de certains édifices ou de certaines portions d'édifices engendre une réévaluation structurale et peut nécessiter du renforcement. De même, avec les années, certaines normes et techniques de construction ont été modifiées et certaines abandonnées, ce qui sous-entend que des éléments structuraux ne satisfont plus aux exigences normales de performance en termes de réponse aux charges et de résistance aux conditions environnementales. En effet, le génie parasismique a été passablement étudié au cours des vingt dernières années et confirme que plusieurs structures sont vulnérables face à un éventuel tremblement de terre. Par exemple, le comportement sismique des ponts existants du Québec demeure un problème important, car la majorité de ces structures ont été construites avant l'implantation des normes parasismiques modernes (FILIAULT et coll., 1997). Les murs de maçonnerie, héritage d'une époque, présentent aussi certaines de ces lacunes.

Avec l'allocation de fonds de plus en plus limitée pour la construction de nouvelles infrastructures, l'ère du renforcement et de la réhabilitation est à la mode depuis quelques années. À cet égard, le défi est de taille pour les concepteurs de trouver des solutions à la fois

économiques et durables et ce, parfois même en assurant les services à la population durant les travaux.

1.2 Applications des matériaux composites

Les matériaux composites développés pour des applications aéronautique, de transports et sportives sont maintenant devenus des produits courants pour ces industries. Pour l'industrie de la construction, là où le choix des matériaux structuraux est bien souvent limité au bois, au béton et à l'acier, les matériaux composites vont s'immiscer dans une industrie qui présente des défis très importants. Leurs possibilités d'applications à cette dernière industrie sont multiples et en voie de développement, mais elles sont encore méconnues par les concepteurs. Néanmoins, plusieurs conférences internationales, *Matériaux composites d'avant-garde pour ponts et charpentes : MCAPC-1* (NEALE et LABOSSIERE, 1992), *Matériaux composites d'avant-garde pour ponts et charpentes : MCAPC-2* (EL-BADRY, 1996), *Recent Advances in Bridge Engineering* (MEIER et BETTI, 1997), *3^d International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures* (JAPAN CONCRETE INSTITUTE, 1997) pour ne nommer que celles-ci et aussi des ouvrages de MUFTI et coll. (1991), MUFTI et coll. (1992) et NANNI (1993) traitent de l'état des connaissances sur l'utilisation des matériaux composites en génie civil. De même, des recommandations de design sont maintenant présentes dans les publications concernant : le confinement de colonnes de SEIBLE et coll. (1997); le renforcement en PRF dans les membrures de béton de SONOBE et coll. (1997) et le renforcement en PRF d'éléments en béton précontraint de GILSTRAP et coll. (1997). L'utilisation de ce nouveau matériau a permis de développer des solutions innovatrices pour faire face aux situations critiques décrites précédemment. Avant de présenter ces solutions, présentons un bref aperçu des matériaux composites et des produits destinés à l'industrie de la construction.

Les matériaux composites communément appelés *polymères renforcés de fibres (PRF)* sont constitués d'un liant polymère dans lequel sont insérées des fibres continues et unidirectionnelles. Les fibres de carbone, de verre et d'aramide (kevlar) se retrouvent le plus souvent dans la fabrication des produits en PRF. En ce qui concerne le liant polymère, les produits thermodurcissables, tels les résines d'époxy, vinylester et polyester sont les liants les plus

présents dans les produits en PRF (ACI, 1996). Maintenant, il existe sur le marché plusieurs produits en matériau composite destinés à l'industrie de la construction comme les barres d'armature, les câbles et tendons de précontrainte, les grillages, les lamelles et feuilles minces, puis aussi sous forme de profilés divers. Ces matériaux en PRF sont voués à remplacer les matériaux conventionnels, là où ces derniers exigent des efforts incessants pour le maintien en bon état des infrastructures. Il convient de mentionner une fois pour toutes qu'avec les matériaux composites, le phénomène de la corrosion, tel que rencontré avec l'acier, ne se pose pas.

En ce qui concerne les solutions relatives à l'utilisation des matériaux composites, notons tout d'abord le renforcement externe de poutres et de colonnes en béton armé traditionnellement effectué avec des plaques d'acier. Cette pratique conventionnelle relativement complexe lors de la mise en chantier, à cause de la manipulation de plaques lourdes, des soudures, des collages et des ancrages à l'élément de support, exaspère les intervenants du projet. Et quant à la durabilité de cette pratique anticipée, elle satisfait peu le niveau de performance souhaité à cause du risque élevé de corrosion à l'interface du plan de colle béton et acier (KARBHARI et ENGINEER, 1996 et TOUTANJI et GOMEZ, 1997). Or, les matériaux composites, presque dix fois plus légers dans certain cas que l'acier et avec une longueur quasi illimitée, rendent la réhabilitation des structures beaucoup plus commode et avantageuse. Ainsi, pour les matériaux composites installés sur des poutres, cette nouvelle technique a pour objectif d'augmenter les propriétés à la flexion et à l'effort tranchant. L'installation d'une lamelle en matériaux composites sur la face inférieure tendue des poutres permet d'augmenter sa capacité en flexion. Dans le même ordre d'idées, le collage de lamelles en PRF sur les parois verticales de la poutre contribue à augmenter la résistance à l'effort tranchant. Des travaux de recherche dans cette direction ont été complétés par LAMOTHE (1999) et LAPIERRE (1999). Dans le cas des colonnes en béton armé, cette technique a pour objectif d'améliorer le comportement en compression de l'élément dû au confinement du béton et aussi augmenter la capacité de la membrure à reprendre des charges latérales. Le confinement procuré en enrobant l'élément d'une enveloppe de matériaux composites permet d'augmenter significativement sa résistance et sa ductilité. Une étude sur ce sujet a été présentée par LAVERGNE (1998). Des cas d'applications pratique de cette technique de renforcement de poutres et de colonnes sont actuellement en cours. En 1996, le renforcement du

stationnement multiétagé Webster de Sherbrooke, Québec, a illustré les applications de cette nouvelle technologie (LABOSSIÈRE et coll., 1997).

Ensuite, une autre solution, déjà en application pour accroître la durabilité et les performances à long terme des infrastructures, consiste à intégrer les matériaux composites lors de la construction. Plusieurs projets de démonstration touchant particulièrement les ponts et passerelles ont été réalisés actuellement à travers le monde. Ces projets intègrent des composites sur une échelle qui varie de manière partielle jusqu'à complète. Parmi les plus récentes réalisations au Canada, mentionnons le pont Taylor à Headingley, Manitoba, considéré comme étant le plus long pont au monde à être renforcé de matériaux composites. De plus, cet ouvrage, dont le comportement est suivi au moyen de fibres optiques, a été ouvert à la circulation en octobre 1997. Quatre poutres de ce pont sont précontraintes par des câbles en PRF de carbone. Les étriers sont, eux aussi, en PRF de carbone. Une portion du tablier contient une armature en fibre de carbone et une partie du parapet contient une armature en fibre de verre. Et puis, une autre application avant-gardiste des composites fut la construction d'une passerelle pour piétons, le *Aberfeldy Golf Course Pedestrian Bridge*, en Angleterre, entièrement fabriquée en matériaux composites.

Somme toute, dans plusieurs pays du monde, de multiples applications intégrant des matériaux composites sont présentes. Toutes ces réalisations ont pour effet de démontrer les avantages reliés à des matériaux composites pour ce qui est de la résistance, du rapport résistance-poids élevé, de la légèreté du produit, de l'installation simple, de la réduction des frais d'entretien de la structure et également de l'amélioration de la durabilité et du comportement à long terme en l'absence de corrosion. Sur ces deux derniers points, les études demeurent limitées pour le contexte du génie civil. Une connaissance limitée des propriétés à long terme de ces nouveaux matériaux en PRF pour des applications structurales limite toujours la progression de cette nouvelle technologie dans l'industrie de la construction. La vérification expérimentale de la performance de cette technique de réparation, dans les conditions environnementales présentes au Canada, est le sujet du présent mémoire. Il s'inscrit dans le contexte plus vaste de l'ensemble des travaux réalisés à l'Université de Sherbrooke sur le renforcement d'ouvrages existants en béton armé avec des matériaux composites.

1.3 Objectifs de la recherche

La réalisation de la présente étude a été effectuée dans le cadre d'un projet de recherche mené en collaboration avec la Direction des structures du Ministère des Transports du Québec. Celle-ci visait le renforcement de poutres en T d'un pont représentatif d'un grand nombre d'ouvrages d'art existants au Québec. Les réparations et les renforcements de structures existantes avec des matériaux composites imposent que ces matériaux soient collés à des surfaces de béton pour reprendre ainsi une partie des efforts sur la structure. Il est nécessaire de s'assurer que les propriétés élastiques et que la transmission de ces efforts à l'interface de béton et du matériau composite ne seront pas affectées, malgré les effets des intempéries.

Ce mémoire débute par une rétrospective des recherches portant sur la durabilité des matériaux composites. Au chapitre 3, on présente un programme expérimental qui porte sur l'évaluation du comportement à la traction de laminés en matériau composite. Les spécimens ont été conditionnés à un environnement donné de manière à étudier l'effet des cycles de gel-dégel et de la température sur la résistance des composites. La présentation et l'analyse des résultats expérimentaux obtenus sont présentées au chapitre 4.

L'adhérence de lamelles en matériaux composites à des éléments de béton ayant subi des conditions d'endommagement accélérées a fait l'objet d'un programme expérimental lequel est présenté au chapitre 5 de ce mémoire. Les effets des cycles de mouillage-séchage et de gel-dégel sont les paramètres étudiés. Les essais réalisés comprennent des tests de flexion sur des poutres et des essais d'arrachement sur des blocs. Au chapitre 6, on présente et analyse les résultats expérimentaux sur les cycles de mouillage-séchage et au chapitre 7, on présente ceux sur les cycles de gel-dégel. Finalement, ce mémoire est complété par la description des faits saillants qui s'en dégagent et des recommandations à prendre en considération.

Chapitre 2

REVUE DES TRAVAUX DE RECHERCHE SUR LA DURABILITÉ DES COMPOSITES

2.1 Introduction

La constatation de la détérioration des infrastructures de génie civil, dont les ouvrages d'art du Québec, a déjà suscité le développement de nombreuses techniques de renforcement, de réhabilitation et de protection. Ainsi, le béton projeté, l'installation de câbles de postcontrainte extérieure, l'installation de plaques d'acier et la multitude de produits et techniques de protection contre la corrosion des barres d'armature en acier n'atteignent pas, dans plusieurs situations, les niveaux de durabilité souhaités à cause des limites inhérentes des matériaux conventionnels en cause, soit le béton et l'acier. Compte tenu des nombreux avantages qu'ils offrent, les matériaux composites pourraient devenir des matériaux de construction de choix pour plusieurs types d'applications. BANTHIA et MACDONALD (s.d.) ont indiqué que la durabilité des matériaux composites est suffisante pour éventuellement remplacer l'acier dans plusieurs applications. Cependant, l'absence de normes et le coût encore relativement élevé font en sorte que l'application des matériaux composites en génie civil est encore limitée. Ces matériaux ne pourraient être acceptés et utilisés à grande échelle par l'industrie de la construction que dans la mesure où leur efficacité économique, tenant compte de la durée de vie, soit compétitive. À juste titre, la durabilité de ces matériaux constitue l'élément crucial qui permettra de décider de leur utilisation de façon avantageuse dans l'industrie de la construction.

L'espérance de service des structures de génie civil étant de l'ordre de 50 à 75 ans, il est indispensable de mener des études pour vérifier les propriétés des matériaux composites face aux conditions de l'environnement. Le sujet de la durabilité a certes été largement étudié pour des

applications aérospatiales, ce qui a permis de développer des matériaux performants pour affronter des conditions extrêmes. Malgré un grand nombre de données, il demeure difficile de transposer cette expertise directement à des projets de construction, à cause des différences tant dans les composants des matériaux, dans leur mode de fabrication, que dans les conditions d'utilisation. Ce chapitre présente donc une revue de la documentation relative aux propriétés et au comportement des matériaux composites et à la durabilité envers les applications de renforcement des structures.

2.2 Les composants du matériau composite

Un matériau composite résulte de la réunion d'au moins deux matériaux différents par leur nature, leur forme et leur fonction, et dont les qualités intrinsèques se combinent et se complètent pour donner un matériau hétérogène dont les performances globales sont améliorées. Le matériau composite, tel que décrit dans ce mémoire, est constitué d'une matrice polymérique et d'un matériau de renfort qui se présente sous forme de fibres, d'où la seconde appellation polymère renforcé de fibres (PRF) prend toute sa signification. La matrice permet essentiellement de transférer aux fibres les contraintes générées par les sollicitations externes. De plus, la matrice protège les fibres des agents d'endommagement. En ce sens, la matrice joue un rôle de premier plan dans l'évaluation de la durabilité des matériaux composites. Quant aux fibres, elles procurent la résistance et la rigidité au composite. Les fibres ont des propriétés nettement supérieures à la matrice et possèdent un comportement linéaire élastique.

2.2.1 La matrice

La matrice, communément appelée *résine*, doit posséder les qualités suivantes : bonne adhésion aux fibres, bonne résistance au cisaillement et bonne ductilité. On se doit de mentionner que les résines présentées dans cette section sont toutes de type organique. Avec la panoplie de résines disponibles sur le marché et leur évolution continue, l'ingénieur doit bien connaître les avantages et les défauts de chacune. Il se peut très bien qu'une résine soit plus performante qu'une autre dans un milieu donné. En fait, les propriétés des résines sont en constante évolution afin de s'harmoniser aux utilisations et aux milieux environnants auxquels elles feront face.

Les propriétés mécaniques d'une matrice organique varient dans le temps sous l'influence de la température, de l'humidité et des rayons ultraviolets. La matrice a donc tendance à se dégrader. Dans l'évaluation de la performance d'un composite, une propriété physique particulièrement importante est la température de transition vitreuse (T_g). Au dessus de celle-ci, la résistance et la rigidité de certaines résines diminuent considérablement. Les matrices organiques se subdivisent en deux grandes classes : les thermoplastiques, s'adoucissant sous la chaleur et se durcissant sous le froid, et les thermodurcissables, subissant une réaction chimique irréversible après polymérisation. Pour obtenir des matériaux composites aux performances plus élevées, on utilise une matrice thermodurcissable. Une description des résines disponibles sur le marché est présentée dans un rapport de l'American Concrete Institute (1996). Les résines les plus rencontrées jusqu'à maintenant dans le contexte du génie civil sont les époxy, les polyester et les vinylester et elles sont présentées brièvement dans ce qui suit. Le tableau 2.1 présente les propriétés typiques de ces résines.

a) Résine époxy

La résine époxy est la matrice la plus couramment employée dans les applications aéronautiques, aérospatiales et militaires. Les avantages des résines époxy sont :

- une excellente résistance aux attaques de plusieurs solutions chimiques;
- une bonne résistance à l'absorption d'eau (selon le procédé et la protection appliquée);
- un faible retrait lors du durcissement;
- une très bonne adhésion à plusieurs substrats;
- une bonne isolation électrique;
- de bonnes propriétés mécaniques et ce jusqu'à 150°C.

Leurs points faibles sont :

- une période de polymérisation assez longue;
- un coût relativement élevé.

b) Résine polyester

La résine polyester non saturé est de loin la plus employée dans la fabrication de pièces structurales en matériaux composites pour les applications les plus diverses. Les avantages des résines polyester sont :

- un faible coût;
- une polymérisation rapide;
- une facilité de coloration;
- de bonnes propriétés électriques et mécaniques;
- des propriétés faciles à modifier par changements simples au niveau de la formulation chimique.

Parmi les désavantages, notons :

- une forte émission de styrène (vapeurs nocives pour la santé);
- un retrait important lors de la polymérisation.

c) Résine vinylester

La résine vinylester est un produit dérivé des résines de polyester non saturé. Cette résine est produite à un coût plus élevé que d'autres résines polyester, mais offre une amélioration des performances mécaniques et chimiques. Les résines vinylester sont aussi reconnues pour leur rigidité, leur flexibilité et leur résistance aux agents environnementaux agressifs.

2.2.2 Les fibres

Dans les produits développés pour les applications de génie civil jusqu'à maintenant, ce sont des fibres continues unidirectionnelles qui sont incorporées dans une matrice polymérique. Les matériaux composites unidirectionnels ainsi créés sont fortement anisotropes, c'est-à-dire que leurs propriétés sont très différentes selon la direction considérée. En conséquence, il est nécessaire d'orienter les fibres dans la direction principale des contraintes. Les fibres les plus présentes sur le marché des produits en PRF sont celles de carbone, de verre et d'aramide. Les informations citées ci-dessous proviennent essentiellement du rapport de l'American Concrete Institute (1996). Le tableau 2.2 présente les propriétés typiques de certaines fibres. Étant donné l'évolution assez rapide des propriétés de chacun de ces matériaux, et de leurs variations selon les

producteurs de fibres, le lecteur doit faire preuve d'une certaine vigilance envers les informations reproduites.

a) Les fibres de verre

Les fibres de verre occupent un vaste marché en raison de leur coût de production peu élevé. Selon leur composition chimique, on en retrouve principalement trois catégories : E, S et C. Le type E occupe environ 80 % à 90 % de la production commerciale de la fibre de verre et est le plus répandu comme renfort dans une multitude d'applications de composites. Les fibres de verre S sont des fibres à haute résistance à la traction et leur résistance mécanique demeure relativement stable à des températures élevées. De par sa composition, le type C se caractérise par sa stabilité chimique dans les environnements corrosifs.

Un des problèmes majeurs que posent les fibres de verre découle de leur haute sensibilité à tout endommagement superficiel. Ainsi, lorsque le composite en fibres de verre est sous contrainte, sa performance peut diminuer considérablement pour un environnement donné. En général, ces fibres affichent une faible résistance à l'humidité et une grande sensibilité aux acides et aux environnements alcalins. Plusieurs travaux de recherche démontrent une dégradation importante lorsqu'elles sont en contact avec le ciment du béton (BANK et coll., 1995).

b) Les fibres de carbone

Les fibres de carbone fréquemment employées en aéronautique et dans la fabrication d'articles de sport sont très appropriées pour des applications de génie civil. L'utilisation de fibres de carbone procure au matériau composite sa rigidité et sa résistance très élevée dans la direction longitudinale. Selon le procédé de fabrication, deux types de fibres se distinguent, soit les fibres à haute résistance et celles à haut module.

Les fibres de carbone résistent à la plupart des solutions chimiques et sont insensibles à l'humidité. Elles sont particulièrement appropriées quand les effets environnementaux sont importants. Cependant, ces avantages peuvent être tempérés par le choix de la résine. Une excellente tenue à la fatigue est également observée avec ces fibres.

c) Les fibres d'aramide

Les fibres d'aramide ont des propriétés mécaniques intermédiaires entre celles des fibres de verre et de carbone. Cependant, la performance de ces fibres organiques peut être altérée de manière importante par l'humidité et les rayons ultraviolets. De plus, leurs caractéristiques en fluage défavorisent leur application en génie civil. Il semble aussi que les acides et les bases dégradent les propriétés intrinsèques de ces fibres.

2.3 Le matériau composite

Le développement de matériaux composites pour des applications aéronautiques a suscité de longs travaux de recherche sur leur susceptibilité à des environnements hostiles. Ainsi, des efforts considérables ont porté sur la détermination des performances de composites exposés à l'humidité et à des températures élevées pendant de longues périodes. SPRINGER (1981; 1984; 1988) a présenté une série d'articles portant sur ces effets, et a fait la synthèse de ses propres travaux et de ceux d'autres auteurs. Les paramètres suivants ressortent de ces études :

- la température et la teneur en humidité varient selon l'épaisseur du matériau et sont fonction du temps jusqu'à l'atteinte d'un état d'équilibre avec l'environnement ambiant;
- la quantité totale (masse) d'humidité à l'intérieur du matériau demeure constante après un certain temps;
- l'humidité et la température induisent des contraintes à l'intérieur du matériau composite en fonction du temps;
- les changements dimensionnels du matériau composite dépendent de la durée d'exposition;
- les performances du matériau composite changent avec le temps (vieillessement).

L'effet de l'humidité sur les matériaux composites est le sujet sur lequel le plus d'études ont été effectuées. Une des principales conclusions est que leur résistance et leur rigidité sont affectées par l'absorption d'eau. Les matériaux composites absorbent de l'humidité par mécanisme de diffusion. Le taux d'absorption d'eau dépend du temps et augmente généralement avec une élévation de la température et de l'humidité relative. Il est possible de ralentir cette absorption, mais on ne peut l'empêcher qu'avec la pose d'enduits imperméables. Les composites obéissent en général à la loi de Fick et ils atteignent un état de saturation qui dépend du type de matériau utilisé, de l'environnement et de la température (MENGES et GISTCHNER, 1980). Les propriétés

mécaniques nécessaires pour évaluer l'effet de cet environnement sont le coefficient de diffusion et le coefficient hygroscopique. Ces observations sont confirmées par BANK et coll. (1995), qui ont présenté un résumé critique des recherches effectuées sur les effets de l'environnement sur les matériaux composites. Ils ont résumé les diverses techniques expérimentales employées, les mécanismes de rupture observés, et les modèles théoriques disponibles. Leur objectif étant de développer une méthodologie d'essais accélérés, ils ont estimé que les expositions les plus critiques seraient l'humidité, les solutions alcalines et acides, le tout dépendant des matériaux constitutifs du composite. Enfin, ils ont souligné que l'exposition à des environnements cycliques, tels que des cycles de gel-dégel et de mouillage-séchage, seront à prendre en considération lors d'applications structurales en génie civil.

2.3.1 L'environnement humide et l'immersion

FYFE et coll. (1996) ont procédé à une évaluation d'un produit en fibres de verre avec une résine époxy (Tyfo S) après 1000 heures d'immersion dans l'eau ou dans l'eau salée à la température ambiante. Les résultats démontrent que la résistance en traction diminue légèrement (un peu plus de 6%), que le module élastique n'est pas affecté et que la présence de sels n'a eu aucun effet sur les propriétés mesurées.

Une étude menée par TSOTSIS et LEE (1997), sur des laminés unidirectionnels de carbone et de verre avec une résine époxy en immersion dans des solutions de pH 7, 8,5 et 10, a démontré que le taux d'absorption est indépendant du pH et que le gain de masse demeure sensiblement le même.

SHEN et SPRINGER (1977) ont vérifié que le module élastique pour des laminés en graphite 0° et 45° varie très peu, quelle que soit la teneur en humidité. Cette même conclusion peut aussi être transposée pour des températures variant de -73 °C à 177 °C. Cependant, pour des laminés 90°, le module élastique diminue considérablement avec une augmentation du contenu en humidité et de la température. La diminution de la valeur du module varie de 50 % à 90 %.

HARPER et NAEEM (1984) ont examiné la résistance de deux résines vinylester renforcées de fibres de verre, et l'ont comparée à celle des résines époxy et polyester régulièrement utilisées en

aérospatiale. Les spécimens ont été soumis à une immersion dans l'eau puis à une exposition à l'humidité relative constante à 95 %, sous des températures de 25 °C, 50 °C et 70 °C, pendant 40 jours. Pour l'ensemble des résultats, des réductions allant de 10 % à 60 % ont été observées et l'exposition à 95 % d'humidité relative est moins sévère. Selon les conclusions de cette étude, les résines vinylester sont adéquates pour être employées dans les environnements où les résines époxy et polyester sont couramment utilisées.

HORINO et coll. (1987) ont effectué des tests d'immersion de laminés dans l'eau chaude à 80 °C; les fibres de verre étaient combinées à deux types de résines polyester. Ces auteurs ont observé une perte de masse de la matrice par dissolution. Après 3000 heures d'immersion, une réduction de résistance en tension de 50 % a été observée, de même qu'une réduction du module élastique de 30 %.

CIRISCIOLI et coll. (1987) ont mis au point un essai accéléré pour évaluer l'effet de l'humidité sur les composites en fibres de carbone. Les résultats ont indiqué que l'humidité et la température élevée (75 °C) ont un effet négatif sur les propriétés mécaniques du matériau. Les essais de traction ont indiqué une résistance et un module élastique de 90 % et 95 % respectivement des valeurs originales.

Des informations concernant l'effet de l'orientation des fibres sur l'absorption en milieu humide se retrouvent dans BLIKSTAD et coll. (1984).

Finalement, ADITYA et SINHA (1992) ont effectué une étude pour déterminer le coefficient de diffusion d'une exposition continue et ce, à partir de données ayant soumis le matériau composite à une exposition périodique. Après 8 heures d'exposition à une température de 70 °C et une humidité relative de 95 %, la température de la chambre chutait à 30 °C, alors que l'humidité demeurait constante à 95 % durant 16 heures. Les conclusions de cette étude montrent que le coefficient de diffusion pour une exposition continue peut être prédit à partir de l'exposition périodique et que l'inverse est aussi vrai. Leurs résultats démontrent aussi que le coefficient de diffusion diminue généralement lorsque le volume de fibres (v_f) augmente.

2.3.2 La température

LORD et DUTTA (1988) ont examiné l'effet de basses températures sur le comportement des matériaux composites. D'après la théorie classique des laminés, cette étude démontre qu'il peut se développer des contraintes résiduelles importantes à la suite d'un grand écart de température. Cet état de contraintes est causé par les différences significatives des coefficients d'expansion thermique, hygroscopique et des rigidités relatives à la fibre et à la matrice. Les contraintes résiduelles peuvent causer des microfissures dans la matrice et à l'interface fibre-matrice et provoquer une dégradation du matériau et de ces propriétés élastiques. Un réseau de fissures augmente en proportion du nombre de cycles thermiques jusqu'à l'atteinte d'un état de saturation. Ces auteurs mentionnent que les effets de la température et de l'humidité devraient être considérés ensemble pour les études du comportement des matériaux composites étant donné l'interaction entre ces deux effets. Finalement, ils suggèrent que des études devraient être effectuées pour vérifier l'effet des cycles de gel-dégel en milieu humide pour des composites ayant de la fissuration au niveau de la matrice.

Dans le même ordre d'idées, MCMANUS et coll. (1996) ont développé un modèle permettant de prédire la densité de la fissuration dans la matrice et ce, en évaluant son impact sur les propriétés du laminé dont le coefficient d'expansion thermique.

Des essais réalisés par FYFE et coll. (1996), sur un produit en fibres de verre et d'une résine époxy (Tyfo S), ont démontré qu'à une température de 60 °C, la résistance n'est pas diminuée mais augmentée légèrement, alors que le module est inchangé.

GOMEZ et CASTO (1996) ont étudié l'effet des cycles de gel-dégel sur des coupons de matériau composite submergés dans une solution d'eau contenant 2 % de NaCl. Ces essais étaient basés sur les grandes lignes de la norme ASTM C-666. Deux types de résines, une polyester et une vinylester, ont été utilisés comme liant à la fibre de verre. La résistance à la flexion, la ductilité et le module de Young sont réduits d'environ 20 à 30 % de leurs valeurs originales après les 300 cycles de gel-dégel, alors qu'une réduction de 2 à 15 % est observée pour l'exposition à la solution saline seulement.

2.4 Les matériaux composites dans les applications de génie civil

SEIBLE et coll. (1997) ainsi que KARBHARI et SEIBLE (1997) ont présenté les performances à court et à long termes des matériaux composites pour des applications de génie civil. Les caractéristiques des fibres de carbone et de verre ainsi que les résines époxy, polyester et vinylester y sont présentées. Enfin, ces auteurs suggèrent des coefficients de réduction à prendre en considération pour le calcul de la résistance dans un design.

YAGI et coll. (1997) ont mesuré la résistance à la traction de lamelles et l'adhérence au béton du produit Replark composé de carbone/époxy, pour des échantillons exposés à des conditions naturelles et accélérées. Après trois ans d'exposition extérieure, à Yokohama au Japon, et après 10 000 heures d'exposition solaire accélérée, aucune perte de résistance en traction n'a été observée. Ces auteurs mentionnent que les 10 000 heures d'exposition peuvent équivaloir jusqu'à 50 années d'exposition naturelle. La même conclusion, à savoir aucune perte de résistance, est tirée à propos de l'adhérence à une surface de béton. Ces mêmes auteurs ont examiné par infrarouge des échantillons de carbone/époxy ayant subi 10 000 heures d'exposition solaire accélérée et ils ont rapporté une légère dégradation uniquement à la surface du matériau. De plus, ils ont mentionné que ce produit possède une bonne durabilité à la suite d'essais de gel-dégel.

La durabilité de poutres renforcées avec des lamelles de matériaux composites a été étudiée par CHAJES et coll. (1995). Des poutres de petites dimensions ont été exposées à deux types d'environnements agressifs, soit à des cycles de gel-dégel ou de mouillage-séchage dans une solution de chlorure. Les résultats de cette étude démontrent qu'en plus d'une réduction de la résistance ultime des poutres, la dégradation causée par l'exposition à un environnement agressif peut modifier leur mode de rupture. Un examen après rupture des poutres, avec un renforcement en fibres de verre ou de carbone, indique que les conditions environnementales produisent une détérioration de l'interface béton-époxy-fibre, laquelle se traduit par un manque d'adhérence entre la plaque et le béton. Selon cette étude, les composites à base de fibres de carbone offrent une meilleure durabilité. De plus, entre les deux conditions testées, ce sont les essais de mouillage-séchage qui ont causé la dégradation la plus importante.

XIE et coll. (1995) ont effectué des essais sur des poutres renforcées de fibres de carbone sur des longueurs différentes. Les poutres ont été soumises, pendant deux mois, soit à la température ambiante, soit à une immersion dans l'eau à 21 °C, ou encore à des cycles chaud-froid (une semaine à 40 °C dans un four, suivie d'une autre à -23 °C dans un réfrigérateur). Les résultats révèlent que la capacité des poutres est augmentée légèrement après deux mois d'immersion, alors qu'une petite diminution de la résistance a été observée après l'exposition aux cycles thermiques. Cette étude a aussi démontré que des poutres endommagées et réparées avec ce produit, et soumises aux mêmes conditions, pouvaient retrouver leur capacité initiale.

KARBHARI et ENGINEER (1996) ont présenté une étude concernant la durabilité à court terme de poutres de petites dimensions renforcées extérieurement avec des matériaux composites. Les fibres de carbone et de verre ont été combinées à deux types de résines, et les spécimens ont été soumis aux cinq conditions environnementales suivantes pendant une période de 60 jours : température ambiante, dans l'eau, dans l'eau de mer, gelés à -15 °C et cycles de gel-dégel. Les détériorations les plus importantes ont été observées pour les échantillons renforcés de fibres de verre et exposés à l'eau ou à l'eau de mer. À propos de ces échantillons, les auteurs mentionnent que leurs propriétés sont modifiées à cause de la pénétration d'eau dans le matériau composite par un mécanisme de diffusion, à travers les microfissures, les vides et les imperfections des interfaces résine-fibre et résine-béton. De plus, cette étude démontre que l'utilisation d'une résine ayant une température de transition de vitreuse élevée augmente la durabilité.

BAUMERT et coll. (1996) ont étudié le comportement à basse température (-27 °C) de poutres renforcées avec des lamelles de fibres de carbone. Ils ont noté une augmentation de la résistance des poutres à basse température et indiqué que cet effet est causé par l'augmentation de la résistance du béton à basse température. La rupture de toutes les poutres s'est produite par le décollement de la plaque. Selon ces auteurs, les changements dimensionnels du béton et du composite causés par l'effet thermique, en particulier dans les zones d'ancrage, ne semblent pas avoir d'effet sur l'interface béton-composite. D'autres informations sur le comportement à basse température se retrouvent dans BAUMERT et coll. (1996)

GREEN et coll. (1997) ont effectué une étude sur le comportement de poutres en béton armé renforcées avec des lamelles en PRF de carbone puis exposées à 50 cycles de gel-dégel. Le cycle de gel-dégel a été fixé à une séquence de 16 heures à -18°C et de 8 heures de dégel dans l'eau à la température de la pièce. Les résultats démontrent que la résistance des poutres renforcées avec ce matériau composite n'est pas affectée et l'interface béton-composite semble conserver son intégrité à la suite de cette exposition.

Enfin, l'influence des cycles de mouillage-séchage sur la capacité et la ductilité de poutres renforcées avec des lamelles en matériaux composites est présentée dans TOUTANJI et GOMEZ (1997). Pendant la séquence de mouillage, les spécimens étaient submergés dans une eau saline et, par la suite, un séchage était effectué avec de l'air chaud à 35°C et à 90 % d'humidité. La durée du cycle de mouillage était de 4 heures et celle du cycle de séchage de 2 heures. Ces auteurs indiquent une diminution substantielle des propriétés après 300 cycles d'exposition et que le choix approprié d'une résine époxy a un impact très important sur la durabilité.

La majorité des études présentées précédemment portait sur la durabilité du renforcement de poutres effectué à l'aide de matériaux composites. En effet, le même genre d'études concernant la durabilité relative au confinement de colonnes en béton réalisé avec ces mêmes matériaux se retrouve à titre de renseignement dans GREEN et SOUDKI (1997), KARBHARI et ECKEL (1995) ainsi que dans TOUTANJI et BALAGURU (1998).

Parmi tous ces essais, il est difficile d'identifier une procédure d'essais qui ait fait consensus auprès des chercheurs. Ces études se distinguent les unes des autres soit par la forme des composites testés (fibres, résines et laminés de composites), soit par les modes d'exposition (immersion, humidité, température, rayons ultraviolets), ou encore par la durée et par la séquence des effets appliqués (cycles de gel-dégel, mouillage-séchage, durée d'immersion, etc.). Il s'en dégage toutefois une conclusion quasi unanime : la recherche sur la durabilité des composites en génie civil est insuffisante.

Tableau 2.1 - Propriétés typiques des résines

Propriétés	Époxy	Polyester	Vinylester
Densité (kg/m ³)	1100 - 1350	1200 - 1400	1120 - 1320
Résistance en traction (MPa)	50 - 100	50 - 80	70 - 90
Module d'élasticité (GPa)	3,0 - 4,0	3,0 - 4,0	3,0 - 3,5
Déformation ultime (%)	1,0 - 8,0	1,0 - 3,0	3,5 - 5,5
Coefficient de Poisson	0,20 - 0,40	0,35 - 0,40	0,37
Coefficient de dilatation (10 ⁻⁶ /°C)	50 - 80	100 - 120	-

Tableau 2.2 - Propriétés typiques des fibres

Propriétés	Verre		Carbone		Aramide	
	E	S	à haute résistance	à haut module	Kevlar TM 49	Twaron TM 1055
Densité (kg/m ³)	2,54	2,48	1,75 - 1,85	1,95 - 2,16	1,45	1,45
Diamètre (microns)	10	10	7	10	11,9	12
Résistance en traction (MPa)	2690 - 3450	4300 - 4500	2340 - 3800	1900 - 2400	3620	3599
Module élastique (GPa)	72,4	85,5 - 86,9	220 - 345	380 - 758	124 - 131	127
Déformation ultime (%)	4,8	5,0	0,6 - 1,8	0,32 - 0,5	2,8 - 2,9	2,5
Coefficient de Poisson	0,2	0,22	-	-	0,35	0,35
Coefficient de dilatation longitudinale (10 ⁻⁶ /°C)	5	2,9	-0,1 à -1,2	-0,6 à -1,6	-2,0	-2,0
radiale (10 ⁻⁶ /°C)	-	-	7 - 12	-	59	59

Chapitre 3

MÉTHODES D'ESSAIS SUR LES LAMELLES COMPOSITES

Une partie du programme expérimental réalisé dans le cadre de ce mémoire de maîtrise est consacrée à l'évaluation des propriétés élastiques des matériaux composites suite aux effets de la température et des cycles de gel-dégel. Les produits testés sont destinés à l'industrie de la construction, et plus particulièrement, aux applications de réhabilitation et de renforcement des structures en béton armé. L'objectif de ces essais est de déterminer si, à la suite d'une exposition donnée, la contrainte ultime et la rigidité du matériau composite sont affectées. Il est à noter que les résultats et l'analyse sont présentés au chapitre suivant. Les sections ci-dessous présentent les détails de l'expérimentation.

3.1 Généralités sur les essais

Les matériaux utilisés dans les essais sont tous disponibles sur une base commerciale. À partir de ces produits, des laminés sous forme de plaques rectangulaires ont été fabriqués au laboratoire de structures de l'Université de Sherbrooke en utilisant le même procédé de fabrication. Le procédé manuel demeure très simple et aucun équipement élaboré n'est utilisé lors de la mise en place ou de la cure du produit. Un des désavantages majeurs avec cette technique est le nombre incontrôlable de paramètres pouvant entraîner une variabilité dans les résultats. Notons par exemple : la compétence de l'opérateur, l'environnement ambiant, les méthodes de travail, le taux d'application de la résine, etc. Néanmoins, lors de la fabrication des laminés en laboratoire, une attention spéciale a été portée afin d'éliminer ou de limiter le plus possible ces paramètres incontrôlables. Ensuite, une fois la période de cure terminée, des échantillons ont été découpés à partir du laminé. Ainsi, pour l'obtention d'échantillons normalisés selon l'ASTM D3039, cela a nécessité l'utilisation d'une cisaille pour le découpage et une meule à haute précision pour

l'opération de la finition (les dimensions spécifiques des échantillons et des laminés sont détaillées pour chacun des matériaux dans leur section respective).

Avant la réalisation de l'essai de traction, l'ajout de talons est nécessaire (figures 3.1 et 3.2). Des essais antérieurs avaient démontré que sans la présence de talons, les limites ultimes du matériau étaient inférieures à celles prévues et de même, le mode de rupture était inacceptable. L'ajout de talons permet donc de corriger ces problèmes. Une attention particulière doit être apportée à la préparation de la surface sur laquelle le talon est collé. Cette surface doit être poncée avec un papier abrasif et nettoyée avec un solvant (alcool ou acétone) par la suite.

L'essai de traction s'est déroulé selon la norme ASTM D3039. Une presse hydraulique MTS a servi à la réalisation de cet essai. La figure 3.3 nous donne un aperçu du montage expérimental utilisé. La réalisation de cet essai est basée sur le contrôle de la force et le taux de chargement a été réglé de manière à ce que la rupture se produise entre la première et la dixième minute, tel que spécifié par la norme. Pour chacune des conditions expérimentales, cinq échantillons ont été testés, ce qui correspondait au minimum exigé par la norme. L'allongement (ΔL) de l'échantillon a été mesuré sur une longueur de référence de 65 mm, au moyen de deux capteurs de déplacements montés sur l'extensomètre. Pour chacun des essais, la force, l'allongement et le déplacement du piston sont les données enregistrées dans un fichier informatique à l'aide du système d'acquisition de données PDMA-16. L'essai s'est déroulé en contrôlant le taux de chargement et ce taux a été fixé, à 5 kN/min. Lors des essais, un problème fréquent a été le décollement prématuré d'un des talons de la lamelle, ce qui provoquait une variation importante sur la mesure de l'allongement à ce moment. Néanmoins, cet effet a été pris en considération dans l'analyse des résultats qui seront présentés plus loin.

3.2 La température

Il est intéressant pour un concepteur de structure de connaître la réponse à la question suivante : est-ce qu'un matériau se comporte de la même façon à une température de -40 degré sous zéro qu'à +40 degré au-dessus de zéro? La réponse va lui permettre entre autres choses de mieux prédire le comportement d'une structure lorsque celle-ci est sollicitée à basse et à haute

température. Soit, par exemple, le comportement d'un pont face à un tremblement de terre en période hivernale ou estivale. Du même coup, la réponse peut justifier le choix ou le rejet d'un matériau pour un milieu ou une condition d'utilisation donné. En général, une variation importante de la température engendre des mouvements et des contraintes non négligeables sur les matériaux. Concernant les récents matériaux composites destinés aux applications de génie civil, ces propriétés envers la température sont méconnues et c'est pourquoi ce sujet est traité dans cette section.

3.2.1 Description des échantillons

a) Carbone/époxy (Replark)

Il s'agit du produit Replark 20, de la compagnie Mitsubishi et consiste en des feuilles préimprégnées de fibres de carbone et d'une résine à base d'époxy de type L700S. Cette résine est constituée en mélangeant deux composants, soit l'agent principal et le durcisseur. Les propriétés et particularités des fibres et de la résine de ce produit sont présentées aux tableaux 3.1 et 3.2.

Un laminé de 330 mm x 550 mm comportant quatre couches de fibres de carbone préimprégnées, toutes orientées dans la direction longitudinale des fibres [0°], a été fabriqué suivant les recommandations du fabricant (figure 3.4). Une cure dans les conditions ambiantes du laboratoire a été poursuivie pendant une période de 15 jours. Par la suite, des échantillons de 15 mm de largeur par 250 mm de longueur (fibres à 0°) ont été coupés à partir de ce laminé. Ces derniers sont demeurés dans les conditions ambiantes du laboratoire pendant un minimum de cinq mois avant le début des essais.

b) Verre-E/époxy (Fibrwrap)

Un tissé sec en fibre de verre, type SEH 51 et une résine TYFO S à base d'époxy mise en marché par la compagnie Hexcel Fyfe ont été utilisés pour ces essais. Les tableaux 3.3 et 3.4 présentent les propriétés et les caractéristiques de chacun des composants de ce produit. De plus, le fabricant a émis les propriétés générales du matériau composite ainsi formé et sont présentées au tableau 3.5.

Deux laminés de 300 mm x 550 mm, comportant deux couches de fibres de verre, ont été fabriqués selon les exigences du fabricant (figure 3.5). Une cure dans les conditions ambiantes du laboratoire a été poursuivie pendant une période de 15 jours. Par la suite, des échantillons de 25 mm de largeur par 250 mm de longueur (fibres à 0°) ont été découpés à partir de chaque laminé. De même, les échantillons sont demeurés dans les conditions ambiantes du laboratoire un minimum de cinq mois avant le début des essais.

3.2.2 Conditionnement des échantillons

Pour déterminer l'effet de la température sur les propriétés mécaniques du matériau composite, la contrainte ultime en traction et le module de rigidité ont été mesurés à six niveaux de température. Les températures pour les essais sont -40 °C, -20 °C, 4 °C, 21 °C, 38 °C et 60 °C. Afin de maintenir la température constante, une chambre environnementale fut adaptée au montage de la presse MTS utilisée pour cet essai de traction. Pour assurer le maintien de la température à l'intérieur de la chambre, un thermomètre digital était situé à proximité de l'échantillon, de même qu'un thermocouple près de l'entrée d'air du ventilateur. Ce thermocouple était relié à un thermostat électronique sur lequel la température désirée était sélectionnée. Les températures de -40 °C, -20 °C et 4 °C ont été maintenues à l'aide d'azote liquide introduit lentement à l'intérieur de la chambre isolée. Pour les températures supérieures à la température ambiante, celles-là étaient maintenues au moyen d'éléments chauffants installés à l'intérieur de l'enceinte. Pour tous les niveaux de température sélectionnés, l'essai de traction fut effectué après que l'échantillon eut été conditionné pendant une période de 20 minutes. Pour l'ensemble de ces essais, une variation de température de ± 2 °C fut constatée et cet écart est acceptable selon la pratique standard ASTM D618.

Les essais n'ont pu être effectués dans un contexte aléatoire, c'est-à-dire que la sélection de la température n'était pas le fruit du hasard, étant donné une restriction en approvisionnement d'azote liquide et de disponibilité du montage. Ainsi, les essais de traction se sont déroulés par bloc de température, c'est-à-dire que lorsqu'une température était sélectionnée, les cinq lamelles étaient testées successivement à cette température.

3.3 Les cycles de gel-dégel

Avec l'application des matériaux composites sur des structures en béton armé, il faut s'assurer que ces matériaux peuvent affronter les mêmes environnements que le béton et, s'il y a lieu, à améliorer la résistance de l'ensemble lors d'une utilisation conjointe du béton et du composite. Les variations de température peuvent entraîner de la microfissuration au niveau de la matrice et à l'interface fibre-matrice et provoquer une dégradation du matériau. La réalisation de ces essais a donc pour objectif de vérifier si les matériaux composites sont affectés à la suite d'une exposition à des cycles de gel-dégel.

3.3.1 Description des échantillons

Carbone/époxy (Replark) et Verre-E/époxy (Fibrwrap)

Dans le cadre de cette expérimentation, le procédé de fabrication des laminés est identique à celui décrit dans la section 3.2.1. Ces laminés ont cependant été fabriqués à une période différente des autres de la section précédente. Il en est de même pour l'obtention des échantillons et mentionnons ici que tous ont 15 mm de largeur et 250 mm de longueur.

3.3.2 Conditionnement des échantillons

La norme ASTM C666 est largement employée dans les laboratoires de matériaux pour vérifier la durabilité des bétons de ciment face aux cycles de gel-dégel. L'essai réalisé avec les matériaux composites a donc été basé sur le concept général de cette norme et aussi en fonction de l'équipement standard disponible au Laboratoire de matériaux de l'Université de Sherbrooke. Les lamelles de 15 mm x 250 mm ont été déposées et immergées dans un récipient rempli d'eau et soumis aux cycles de gel-dégel. La température variait automatiquement de 5 °C à -18 °C et de -18 °C à 5 °C, en alternance, environ cinq fois par jour. Après 300, 600 et 900 cycles, des lamelles étaient retirées de cet environnement successivement. Puis, étant donné la disponibilité restreinte du montage expérimental, tous les échantillons ont été testés après que les derniers échantillons aient terminé les 900 cycles de gel-dégel.

Ceci complète la présentation des éléments entourant l'expérimentation. Les résultats et l'analyse de ces essais sont présentés dans le chapitre suivant.

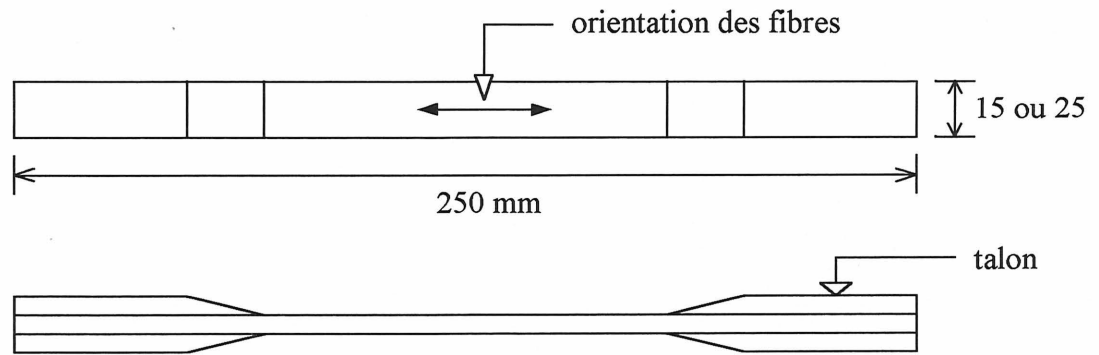


Figure 3.1 - Lamelle d'essai avec l'ajout des talons

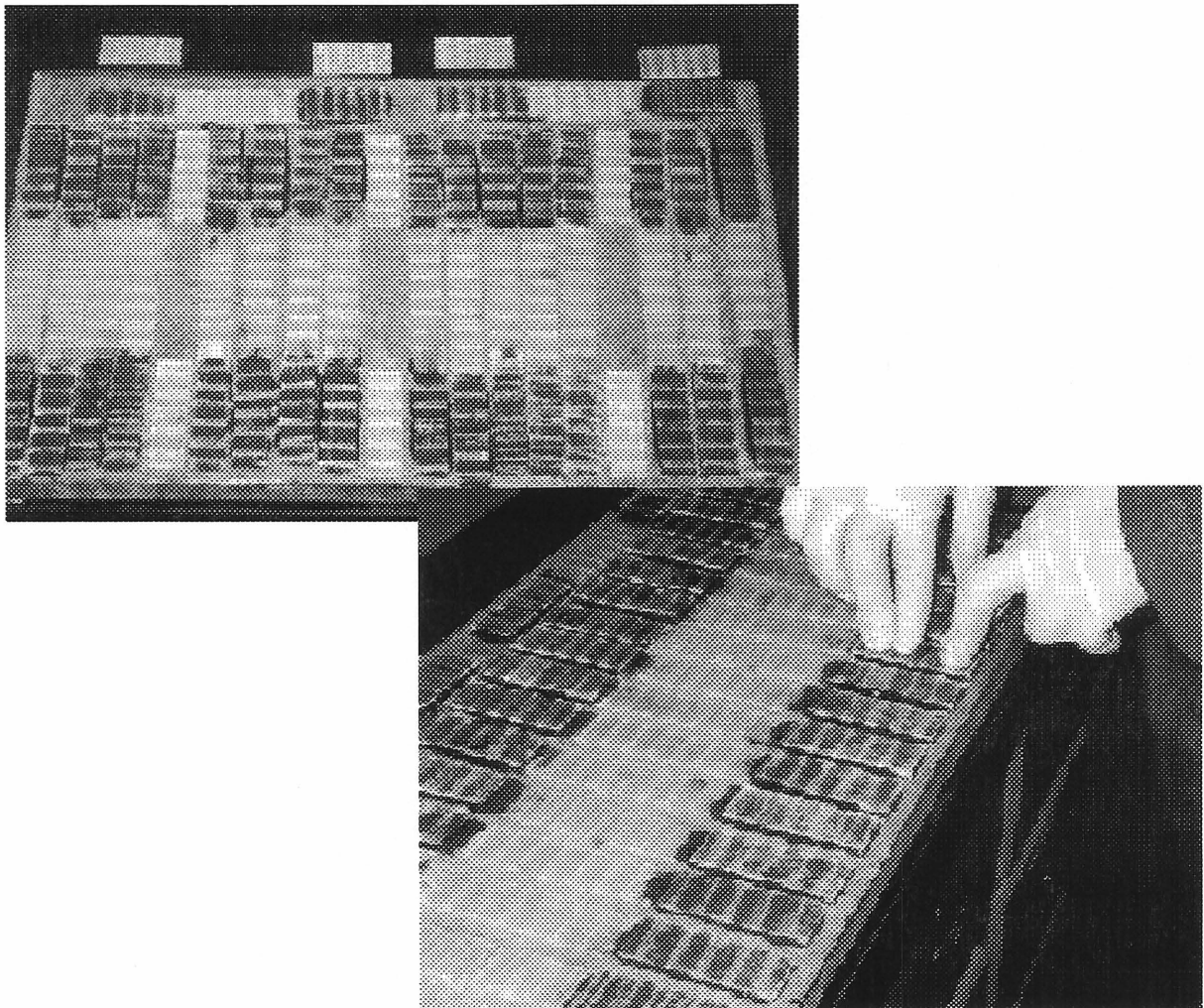


Figure 3.2 - Installation des talons sur les lamelles

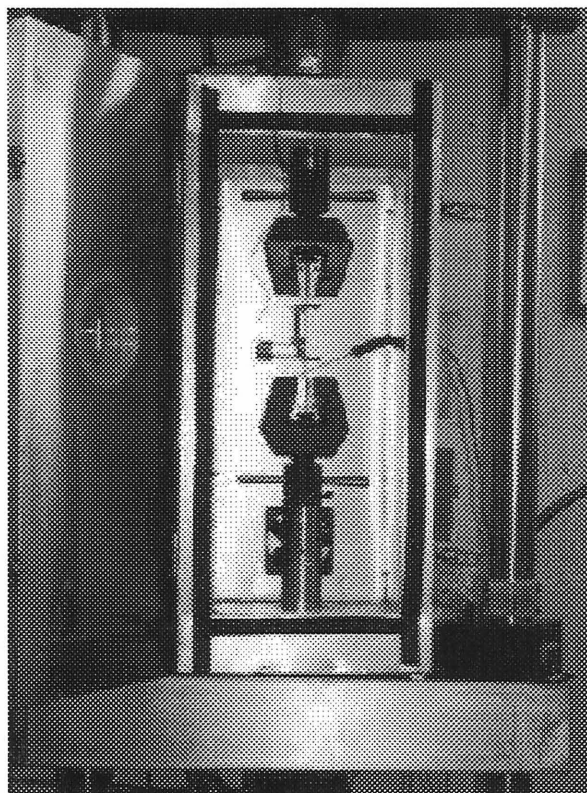
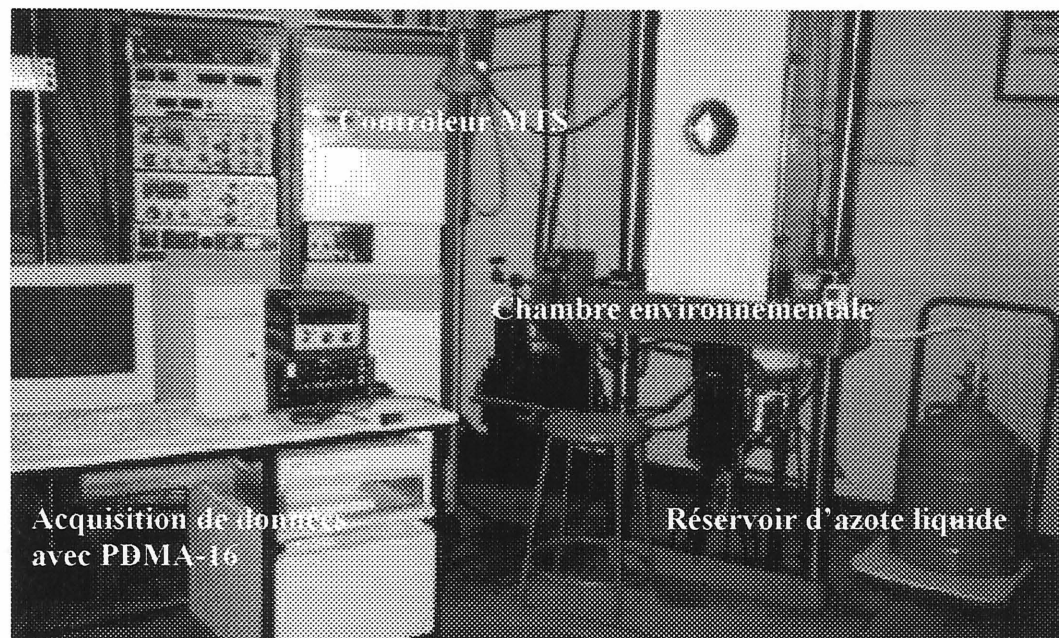


Figure 3.3 - Vues du montage expérimental et de l'intérieur de la chambre environnementale

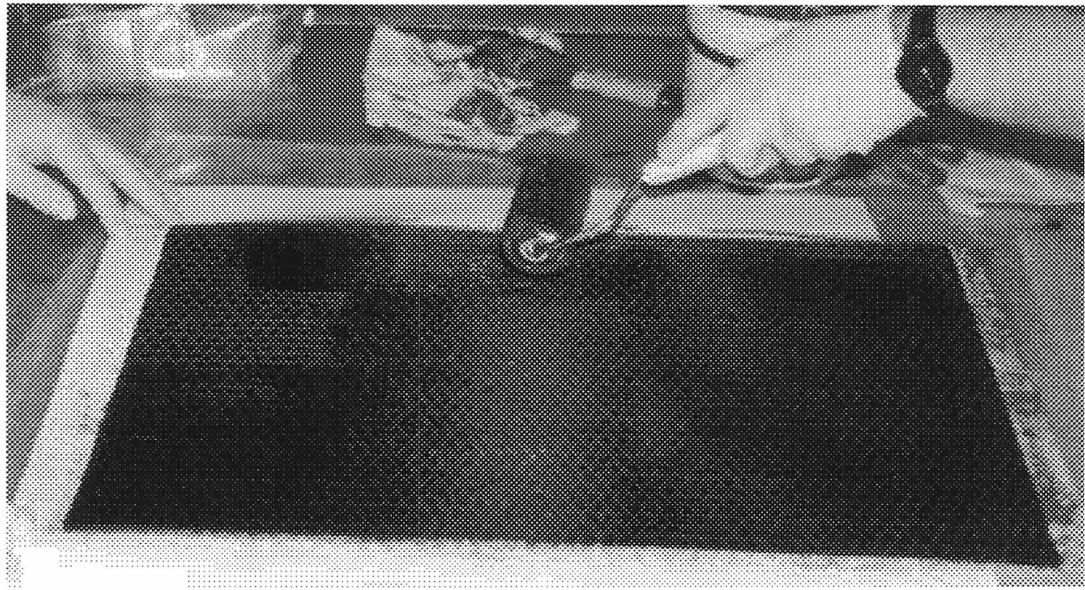


Figure 3.4 - Fabrication du laminé de carbone/époxy

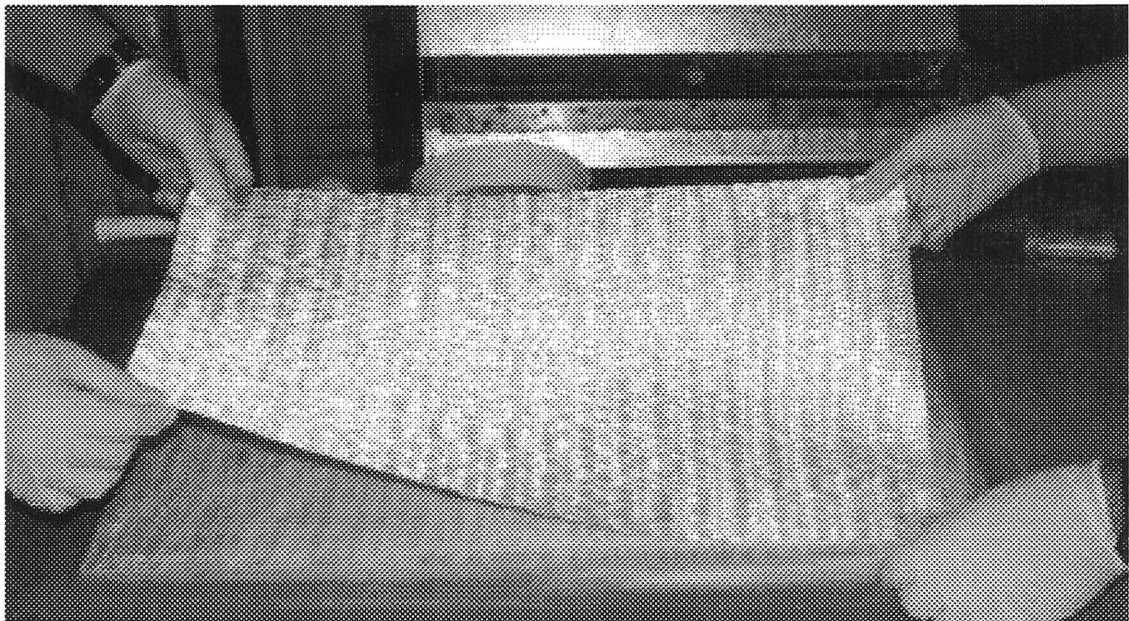


Figure 3.5 - Fabrication du laminé de verre-E/époxy

Tableau 3.1 - Caractéristiques et propriétés de la résine de Mitsubishi

Type		L700S
Température d'utilisation		15°C ~ 35°C
Base de la résine		époxy
Rapport de mélange (par masse)		Agent principal : 2 Durcisseur : 1
Densité	Agent principal Durcisseur	1,13 1,05
Viscosité (MPa·S)	30°C (86°F)	2500
	23°C (73°F)	4000
	10°C (50°F)	15000
Taux d'application	kg/m ²	0,50 ~ 0,70
Vie en pot (minutes)	30°C (86°F)	50
	23°C (73°F)	70
Temps de prise (heures)	30°C (86°F)	3,5
	23°C (73°F)	6,0
Période de cure (jours)	30°C (86°F)	5
	23°C (73°F)	7
Résistance en tension	MPa	29,45
Résistance en flexion	MPa	39,25
Résistance en cisaillement	MPa	9,80
Contrainte de cisaillement au joint (τ)	MPa	0,15 (F.S.=3)

Source : fiche technique de Mitsubishi Chemicals Co.

Tableau 3.2 - Propriétés des fibres de carbone préimprégnées de Replark 20

Masse surfacique (g/m ²)	200
Densité des fibres (kg/m ³)	1800
Épaisseur de conception (mm)/couche	0,111
Épaisseur après l'application de résine (mm)	0,45
Résistance en tension (MPa)	3400
Module élastique (MPa)	230000
Déformation ultime (%)	1,4

Source : fiche technique de Mitsubishi Chemicals Co.

Tableau 3.3 - Caractéristiques et propriétés de la résine Tyfo S

Composantes de base		époxy A : Bisphenol A / Epichlorohydrin catalyseur B : Polyoxypropylenediamines
Rapport de mélange (par volume)	époxy A : catalyseur B :	100 parties 42 parties
Viscosité (25°C) (ASTM D445 et D2393-80)	époxy A : catalyseur B :	110-150 cps 6-15 cps
Propriétés en traction (ASTM D638 type 1)		
Résistance en traction	moyenne	70 MPa
	minimum	66 MPa
Module élastique	moyenne	3178 MPa
	minimum	2930 MPa
Déformation (21°C)	moyenne	5,0 %
	minimum	3,5 %
Propriétés en flexion (ASTM D790)		
Résistance en flexion	moyenne	79 MPa
	minimum	72 MPa
Module de flexion	moyenne	2758 MPa
	minimum	2586 MPa
Vie en pot	4 - 6 heures à 38°C	
Conditions d'entreposage	endroit sec entre 5°C à 32°C	
Taux d'application avec le saturateur	363 g de résine pour 454 g de fibre	

Source : fiche technique de Hexcel Fyfe Co.

Tableau 3.4 - Propriétés de la fibre de verre-E

Résistance en traction	moyenne	2068 MPa
	minimum	1793 MPa
Module élastique en traction	moyenne	72395 MPa
	minimum	67569 MPa
Déformation ultime	moyenne	3,2 %
	minimum	3,0 %

Source : fiche technique de Hexcel Fyfe Co.

Données selon ASTM D2324 à 22 °C, 50 % d'humidité relative

Tableau 3.5 - Propriétés du matériau composite verre-E/époxy (Fibrwrap)

Produit	SEH 51
Résistance en traction (MPa)	454
Module élastique en traction (MPa)	22700
Déformation ultime (%)	2
Résistance à 90° (MPa)	41,4
Coefficient de dilatation thermique	$4,3 \times 10^{-6}$

Chapitre 4

EFFETS DE LA TEMPÉRATURE ET DU GEL-DÉGEL SUR LES LAMELLES COMPOSITES

Les essais de traction sur les lamelles composites présentés au chapitre précédent vont nous permettre de vérifier les propriétés élastiques des matériaux composites après avoir subi une exposition donnée. Pour l'ensemble des données obtenues, une analyse statistique est effectuée dans le but de vérifier les effets de la température et du gel-dégel sur les matériaux composites employés. La contrainte ultime et le module élastique sont les propriétés étudiées dans cette analyse. Toutefois, avant la présentation des résultats, nous présentons des équations élémentaires sur les propriétés des matériaux composites ainsi que la méthodologie statistique employée.

4.1 Brève analyse des composites unidirectionnels

La présentation de quelques équations de base des composites unidirectionnels a pour but d'établir les paramètres permettant de calculer les propriétés des matériaux composites résultant du mélange des fibres et de la matrice. Le comportement mécanique d'un matériau composite dépend de nombreux facteurs dont les propriétés mécaniques de chacun des composants, la fraction volumique de chaque composant, l'orientation des fibres, la résistance de l'interface fibre-matrice, etc. Les équations présentées ci-dessous sont à la base de l'analyse des matériaux composites unidirectionnels. Ces équations, extraites du volume de AGARWAL et BROUTMAN (1990), ne sont que sommaires mais suffisantes à l'analyse des essais expérimentaux pour l'ensemble du programme expérimental.

Par convention, les indices c, f et m réfèrent au composite, aux fibres ou à la matrice. L'un des plus important facteurs pour la détermination des propriétés des matériaux composites est l'influence de la proportion *fibres-matrice*. Considérant un volume v_c de matériau composite qui consiste en un volume v_f de fibres et en un volume v_m de matrice, on exprime la fraction volumique V de la façon suivante :

$$V_f = \frac{v_f}{v_c}, V_m = \frac{v_m}{v_c} \quad (4-1)$$

Pour le calcul de la contrainte et de la rigidité longitudinales d'un matériau composite, on prend pour acquis qu'il n'y a aucun glissement entre les fibres et la matrice, et que les déformations demeurent uniquement dans le domaine élastique. On peut alors écrire que :

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon_c \quad (4-2)$$

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f \quad (4-3)$$

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_m \quad (4-4)$$

Les contraintes σ_f et σ_m agissent respectivement sur une aire de fibre A_f et de matrice A_m . Il est de circonstance de mentionner que le module d'élasticité des fibres est toujours beaucoup plus grand que celui de la matrice, et selon les équations (4-3) et (4-4), la contrainte dans les fibres sera toujours plus grande que celle dans la matrice. Ainsi, les charges P_f et P_m reprises par les fibres et la matrice sont :

$$P_f = \sigma_f A_f = E_f \varepsilon_f A_f \quad (4-5)$$

$$P_m = \sigma_m A_m = E_m \varepsilon_m A_m \quad (4-6)$$

La charge résultante P_c reprise par le matériau composite est la somme des charges reprises par les fibres et la matrice :

$$P_c = P_f + P_m \quad (4-7)$$

Cette force résultante induit une contrainte moyenne σ_c sur une aire de section brute A_c du matériau composite. Par conséquent :

$$P_c = \sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m$$

$$\sigma_c = \sigma_f \frac{A_f}{A_c} + \sigma_m \frac{A_m}{A_c} \quad (4-8)$$

Pour un composite avec fibres parallèles, les fractions volumiques peuvent s'exprimer ainsi :

$$V_f = \frac{A_f}{A_c}, V_m = \frac{A_m}{A_c} \quad (4-9)$$

Et l'équation 4-8 peut-être réécrite en fonction des fractions volumiques de la façon suivante :

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (4-10)$$

Le deuxième terme de l'équation, relié à la matrice, est relativement petit et généralement, la contrainte dans la matrice σ_m peut être considérée égale à zéro.

En dérivant cette dernière équation par rapport à la déformation, on obtient :

$$\frac{d\sigma_c}{d\varepsilon} = \frac{d\sigma_f}{d\varepsilon} V_f + \frac{d\sigma_m}{d\varepsilon} V_m \quad (4-11)$$

où la différentielle ($d\sigma / d\varepsilon$) représente la pente d'une courbe contrainte-déformation à une déformation donnée. Puisque que l'on considère le matériau composite comme linéaire et que l'on demeure dans le domaine élastique, les pentes ($d\sigma / d\varepsilon$) demeurent constantes et l'on obtient ainsi l'équation du module élastique :

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (4-12)$$

Les équations 4-10 et 4-12 indiquent bien que les contributions des fibres et de la matrice, dans les propriétés moyennes du composite, sont proportionnelles à leurs fractions volumiques. Dans le domaine des matériaux composites, ces relations sont appelées *règle des mélanges*.

4.2 Éléments d'analyse statistique

Les facteurs étudiés dans le cadre de cette expérimentation sont la température et les cycles de gel-dégel. Ces facteurs ont été traités indépendamment c'est-à-dire un à la fois. Les informations contenues dans cette section sont tirées du volume *Design and Analysis of Experiments* de MONTGOMERY (1997). Pour chacun des facteurs, nous avons déterminé le nombre a de niveaux (ou a traitements) et un nombre n d'échantillons à tester pour chacun de ces niveaux.

Pour l'analyse statistique, les résultats de l'expérimentation peuvent apparaître sous une forme telle que présentée au tableau 4.1. Le modèle statistique pouvant décrire les résultats repose sur le modèle linéaire suivant :

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (4-13)$$

où y_{ij} est l'observation à la position ij , μ est le paramètre commun de tous les traitements, qui est la moyenne de l'ensemble des observations. Le paramètre τ_i est l'effet du i^{e} traitement, et ε_{ij} est la composante aléatoire de l'erreur. L'objectif recherché est de tester une hypothèse appropriée à propos des effets des traitements et d'avoir un estimé de ces effets. Selon notre expérimentation, on applique un modèle à effet fixe puisque que nous avons prédéterminé les niveaux des essais. Pour ce modèle, les effets des traitements τ_i se représentent de la façon suivante :

$$\sum_{i=1}^a \tau_i = 0 \quad (4-14)$$

L'analyse de variance repose sur les hypothèses de bases suivantes :

- les erreurs ε_{ij} sont normalement distribuées et indépendantes ayant une moyenne égale à zéro et une variance constante σ^2 .
- les observations y_{ij} sont normalement distribuées et indépendantes avec une moyenne $\mu + \tau_i$ et une variance constante σ^2 .

Soit $y_{i.}$ représentant la somme des observations pour le i^{e} traitement, et $\bar{y}_{i.}$ représentant la moyenne de ce i^{e} traitement. Dans le même ordre d'idées, définissons $y_{..}$ comme étant la somme totale de toutes les observations, et $\bar{y}_{..}$ comme la moyenne générale de l'ensemble des observations. Exprimé symboliquement, nous avons :

$$\begin{aligned} y_{i.} &= \sum_{j=1}^n y_{ij}, & \bar{y}_{i.} &= y_{i.}/n, & i &= 1, 2, \dots, a \\ y_{..} &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}, & \bar{y}_{..} &= y_{..}/N \end{aligned} \quad (4-15)$$

avec $N = an$, le nombre total d'échantillons. Il est à noter que le "point" situé en indice implique une sommation sur l'indice qu'il remplace.

La moyenne du i^{e} traitement est $E(y_{ij}) \equiv \mu_i = \mu + \tau_i, i = 1, 2, \dots, a$. Ainsi, la moyenne du i^{e} traitement consiste en la moyenne générale plus l'effet du i^{e} traitement. Nous sommes intéressés par un test d'égalité entre les moyennes des a traitements, lequel s'exprime de la façon suivante :

$$\begin{aligned} H_0 : \mu_1 &= \mu_2 = \dots = \mu_a \\ H_1 : \mu_i &\neq \mu_j \quad \text{pour au moins une paire}(i, j) \end{aligned}$$

Notons que si l'hypothèse H_0 est vraie (hypothèse nulle), tous les traitements ont en commun une moyenne μ .

Le processus de l'analyse de variance est relativement simple et implique certaines opérations de calculs. Ainsi, la somme totale des carrés,

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 \quad (4-16)$$

est utilisée pour mesurer la répartition de la variabilité de l'ensemble des données. En développant cette équation nous avons :

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 \quad (4-17)$$

Cette équation signifie entre autres que la variabilité globale provient de deux sources, à savoir la variabilité relative aux traitements et celle due à l'erreur à l'intérieur des traitements. Symboliquement l'équation (4-17) peut s'écrire

$$SS_T = SS_{\text{Traitements}} + SS_E \quad (4-18)$$

où $SS_{\text{Traitements}}$ est la somme des carrés relative aux traitements et SS_E est la somme des carrés relative à l'erreur. Rappelons qu'il y a au total N observations, en conséquence SS_T possède $N - 1$ degrés de liberté et pour a traitements, $SS_{\text{Traitements}}$ possède $a - 1$ degrés de liberté. De plus, s'il y a a traitements, nous avons $N - a$ degrés de liberté pour l'erreur.

Les moyennes des carrés des écarts $MS_{\text{Traitements}}$ et MS_E peuvent être exprimées sous la forme suivante :

$$MS_{\text{Traitements}} = \frac{SS_{\text{Traitements}}}{a - 1} \quad (4-19)$$

et

$$MS_E = \frac{SS_E}{N - a} \quad (4-20)$$

D'après le théorème de Cochran, chaque somme des carrés ($SS_{\text{Traitements}}$ et SS_E) est, en divisant par σ^2 , une variable aléatoire *chi-carré* distribuée indépendamment. Alors si l'hypothèse nulle est vraie, le ratio

$$F_0 = \frac{MS_{\text{Traitements}}}{MS_E} \quad (4-21)$$

suit une distribution F avec $a - 1$ et $N - a$ degrés de liberté. L'équation 4-21 est utilisée comme test statistique pour vérifier l'hypothèse nulle, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de différences entre les moyennes des traitements. Ainsi, nous devons rejeter l'hypothèse H_0 et conclure qu'il y a une différence entre les moyennes des traitements si

$$F_0 > F_{a, a-1, N-a}$$

De plus, il est possible grâce au théorème de Cochran d'obtenir une nouvelle formulation pour les sommes de carrés, en réécrivant et simplifiant les définitions de $MS_{\text{Traitements}}$ et de SS_T dans l'équation (4-17), de sorte que nous obtenons

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{N} \quad (4-22)$$

et

$$SS_{\text{Traitements}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a y_{i.}^2 - \frac{y_{..}^2}{N} \quad (4-23)$$

Quant à la somme des carrés des erreurs, elle est obtenue de la façon suivante :

$$SS_E = SS_T - SS_{\text{Traitements}} \quad (4-24)$$

Cette procédure d'analyse est résumée au tableau 4.2. Ce dernier est appelé **tableau de l'analyse de variance**.

Étant donné que le modèle statistique (4-13) repose uniquement sur des relations algébriques, il est nécessaire de vérifier si les hypothèses de base sont respectées. Si elles le sont, l'analyse de variance est exacte pour le test d'hypothèse d'aucune différence entre les moyennes des traitements. Pour vérifier si les hypothèses de bases et le modèle statistique sont adéquats, une étude relative aux erreurs est nécessaire. Cette procédure est appelée analyse des résidus.

La distribution normale des erreurs et leur indépendance face aux traitements sont à vérifier. Pour le premier cas, si tous les points de l'analyse sont situés à proximité d'une droite, sur un graphique de probabilité, cela indique bel et bien que les erreurs sont distribuées normalement et le modèle statistique est adéquat. Dans le deuxième cas, l'indépendance des essais est assurée si il y a une bonne dispersion de l'erreur et que l'on n'observe pas de quelconque tendance de ces erreurs selon l'ordre des essais ou selon le traitement donné.

Finalement, lorsque nous rejetons l'hypothèse H_0 et affirmons qu'il y a une différence entre les moyennes des traitements, il est intéressant de déterminer laquelle ou lesquelles des moyennes sont différentes des autres. Pour effectuer ce genre de comparaison, la méthode LSD de *Fisher* a été employée. Une valeur LSD est calculée avec la relation suivante :

$$LSD = t_{\alpha/2, N-a} \sqrt{\frac{2MS_E}{n}}$$

où $t_{\alpha/2, N-a}$ est une valeur de la distribution de référence de la statistique t . Avec cette méthode, on compare la différence observée entre deux moyennes de chaque traitement à la valeur LSD. Si $|\bar{y}_i - \bar{y}_j| > LSD$, on conclut que les moyennes μ_i et μ_j diffèrent.

Dans le cadre de l'expérimentation présentée ici, un logiciel d'applications statistiques a été employé pour le traitement des données et pour les illustrations graphiques.

4.3 Effet de la température

4.3.1 Résultats expérimentaux

En tout premier lieu, les modes de rupture typiques ainsi que la codification utilisée pour décrire la rupture, selon la norme ASTM D3039, sont présentés à la figure 4.1. Pour l'ensemble des essais on retrouve, dans les tableaux de résultats, les observations concernant l'épaisseur des lamelles, la force maximale atteinte, la contrainte correspondante et le code de la rupture.

Aux tableaux 4.3 et 4.4, les résultats des essais de traction sont présentés respectivement pour le carbone/époxy et le verre-E/époxy. L'annexe A (section A.1) contient l'ensemble des courbes non traitées de la contrainte en fonction de la déformation. Sur la plupart de ces courbes, un problème relié au fonctionnement de l'extensomètre est observable. Ces courbes brutes n'ont pas été corrigées puisque le problème en question n'a aucune incidence sur l'analyse des résultats.

4.3.2 Effet sur la contrainte ultime

Il a été estimé, pour le carbone/époxy, que le pourcentage de fibres est d'environ 27 %. D'après les propriétés des fibres mentionnées au tableau 3.2 et l'équation 4-10, la contrainte ultime théorique est alors de 918 MPa. À titre de renseignement, les valeurs de la contrainte expérimentale à une température de 21 °C varient de 813 MPa à 966 MPa (tableau 4.3). Cette variation de la contrainte semble normale compte tenu du procédé de fabrication utilisé. De plus, une autre source de variations peut être attribuable à des efforts parasites reliés au montage : l'alignement de l'échantillon et le type de mâchoire utilisé.

Pour le verre-E/époxy, le pourcentage de fibres est situé entre 25 % et 28 %. Les valeurs de contrainte ultime que l'on obtient expérimentalement à une température de 21 °C varient de 438 MPa à 506 MPa (tableau 4.4). Celles-ci sont relativement proches de la valeur obtenue selon la règle des mélanges et de celle fournie par le fabricant de 454 MPa.

Maintenant nous sommes rendus à l'étape de vérifier, d'un point de vue statistique, si la température affecte la résistance ultime. Le plan d'expérimentation consiste en une conception à un facteur; la température, comprenant six niveaux; -40 °C, -20 °C, 4 °C, 21 °C, 38 °C et 60 °C.

Les tableaux 4.5 et 4.7 présentent les valeurs de contrainte ultime pour les échantillons de carbone et de verre. Une analyse de variance a été effectuée avec les hypothèses suivantes (niveau de signification de 95 %) :

H_0 : la valeur moyenne de la contrainte est la même quelle que soit la température.

H_1 : la température influence la valeur moyenne de la contrainte ultime du composite.

L'analyse de variance pour le carbone/époxy produit les résultats donnés au tableau 4.6, où SS_T , $SS_{\text{Traitements}}$ et SS_E sont donnés par :

$$SS_T = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^5 y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{30}$$

$$SS_{\text{Traitements}} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^6 y_{i.}^2 - \frac{y_{..}^2}{30}$$

$$SS_E = SS_T - SS_{\text{Traitements}}$$

À l'aide d'un tableau décrivant la distribution F (appendice IV, MONTGOMERY 1997), on trouve que $F_{0.05,5,24} = 2.62$. Notons que les indices 0.05, 5 et 24 réfèrent respectivement au niveau de signification de 95 % et aux degrés de liberté relatifs aux traitements ($a - 1$) et aux erreurs ($N - a$). Puisque $F_0 = 11.08 > 2.62$, l'hypothèse H_0 doit être rejetée et on peut conclure que la température affecte la valeur moyenne de la contrainte ultime du carbone/époxy.

Le tableau 4.8 résume les conclusions de l'analyse de variance pour le verre-E/époxy. Il apparaît que $F_0 > F_{0.05,5,24}$ ce qui indique qu'il faut rejeter l'hypothèse H_0 et conclure que la température influence également la valeur moyenne de la résistance ultime de ce composite.

De plus, il est intéressant de déterminer laquelle ou lesquelles des moyennes sont différentes des autres. Pour ce faire, un test utilisant la méthode LSD a été employé et les calculs sont présentés à l'annexe B (section B.1). La principale conclusion qui s'en dégage confirme qu'il n'y a pas de différences importantes entre les contraintes ultimes pour les températures allant de -40°C à $+38^\circ\text{C}$. Cependant pour la température 60°C , il y a une diminution substantielle de la contrainte ultime, et ce pour les deux produits testés. Une diminution de près de 30 % est notée pour le carbone/époxy et pour le verre-E/époxy, elle est de 45 %. La représentation graphique des observations de la contrainte ultime est illustrée aux figures 4.2 et 4.3. La conclusion de la méthode LSD est observable avec le groupe d'échantillons 6 correspondant à la température de 60°C .

Afin de vérifier la validité du modèle statistique utilisé (4-13), certaines hypothèses doivent être satisfaites et une analyse des résidus (erreurs) doit être effectuée. Cette analyse est présentée en

détails à l'aide de graphiques à l'annexe B (section B.2). Elle nous permet de conclure que les erreurs sont distribuées normalement et qu'elles sont indépendantes. Le modèle employé pour l'analyse est donc bien valide.

4.3.3 Effet sur le module élastique

Le module élastique a été calculé entre deux niveaux de déformation et le choix de cet intervalle a été sélectionné selon le type de matériau étudié. D'après les graphiques de la contrainte en fonction de la déformation, non présentés dans ce mémoire, les valeurs du module élastique proviennent d'une régression linéaire effectuée entre $1000\mu\epsilon$ et $4000\mu\epsilon$ pour le composite avec fibres de carbone, ou entre $1000\mu\epsilon$ et $6000\mu\epsilon$ pour le composite avec fibres de verre. Ce choix respecte les recommandations générales de la norme ASTM D3039. Ces valeurs sont justifiables par le fait que les déformations en service du matériau composite seront peu élevées. De plus, ces limites ont été choisies pour tenir compte d'un paramètre incontrôlable introduit par des soubresauts de l'extensomètre à des niveaux de déformation supérieurs à $4000\mu\epsilon$ et à $6000\mu\epsilon$.

Nous avons mentionné à la section précédente le pourcentage de fibres que l'on retrouve dans les lamelles composites. Avec la règle des mélanges (4-12) et les propriétés du module élastique des composants mentionnés à la fin du chapitre 3, il est possible de calculer une valeur théorique du module élastique. Pour le carbone/époxy, nous avons dû émettre une hypothèse concernant le module E_m de la résine époxy utilisée, que nous avons fixé à 3000 MPa. Pour le verre-E/époxy, la valeur de E_m est disponible. On obtient ainsi une valeur théorique du module élastique de 64 290 MPa pour le carbone/époxy et de 22 560 MPa pour le verre-E/époxy. La corrélation entre les valeurs théoriques et celles obtenues expérimentalement est assez bonne.

Les tableaux 4.7 et 4.9 présentent les valeurs du module élastique pour les échantillons de carbone et de verre. Une analyse de variance a été effectuée avec les hypothèses suivantes (niveau de signification de 95 %) :

H_0 : la valeur moyenne du module élastique est la même quelle que soit la température.

H_1 : la température influence la valeur moyenne du module élastique du composite.

Les tableaux 4.8 et 4.10 résument les conclusions de l'analyse de variance de chacun des composites. Concernant les échantillons avec fibres de carbone, il apparaît que $F_0 < F_{0.05,5,24}$ ce qui indique que l'hypothèse H_0 est adéquate. Pour les échantillons avec fibres de verre, il est noté que $F_0 > F_{0.05,5,24}$ ce qui indique qu'il faut rejeter l'hypothèse H_0 et conclure que la température influence la valeur moyenne du module élastique pour ce type de composite.

Même si l'analyse de variance n'indique pas de différence significative pour les échantillons avec fibres de carbone, il est recommandé de vérifier s'il y a une ou des moyennes qui se distinguent les unes des autres avec la comparaison LSD (annexe B, section B.1). La conclusion qui en ressort est qu'il y a une différence significative pour le module élastique seulement entre une température de 21 °C et 60 °C. Cependant, étant donné une variabilité importante des données à la température de 60 °C, cette conclusion est sujette à interprétation. Les modules élastiques observés lors des essais sont présentés à la figure 4.4. Par ailleurs, avec les échantillons avec fibres de verre, la méthode permet de conclure qu'il y a une diminution importante du module élastique pour la température de 60 °C. Cette diminution est d'environ 20 %. La figure 4.5 démontre bien cette conclusion. De plus avec cette figure, il y a une tendance à l'effet qu'à basses températures, une légère augmentation du module est observée.

L'analyse des résidus présentée à l'annexe B (section B.2) confirme que les erreurs sont distribuées normalement et qu'elles sont indépendantes. Donc, le modèle statistique employé est bien valide.

4.4 Effet des cycles de gel-dégel

4.4.1 Résultats expérimentaux

Les résultats des essais de traction, sur les lamelles de référence et sur celles soumises aux 300, 600 et 900 cycles de gel-dégel appliqués selon la méthode décrite à la section 3.3, sont présentés respectivement aux tableaux 4.13 et 4.14 pour le carbone/époxy et le verre-E/époxy. Chaque tableau regroupe les données expérimentales sur l'épaisseur des échantillons, la résistance en traction, la contrainte correspondante et le mode de rupture observé. L'annexe A (section A.2)

contient l'ensemble des courbes expérimentales brutes de la contrainte en fonction de la déformation.

4.4.2 Effet sur la contrainte ultime

Les tableaux 4.15 et 4.17 présentent les valeurs de contrainte ultime pour les échantillons de carbone et de verre. Cependant, un fait important est à souligner pour le produit carbone/époxy. Dans le cadre de cette expérimentation, l'épaisseur de la lamelle est plus élevée que celle observée sur les lamelles à la section 4.3. C'est donc dire que lors de la fabrication, une quantité plus importante de résine a été appliquée et a eu une conséquence importante sur les valeurs de la contrainte ultime et du module élastique. Cette conséquence était bien prévisible puisque les propriétés sont directement reliées aux proportions fibres-matrice tel qu'illustré avec la règle de mélanges.

Une analyse de variance a été effectuée avec les hypothèses suivantes (niveau de signification de 95 %) :

H_0 : la valeur moyenne de la contrainte est la même quelle que soit le nombre de cycles de gel-dégel.

H_1 : le nombre de cycles de gel-dégel influence la valeur moyenne de la contrainte ultime du composite.

Les tableaux 4.16 et 4.18 résument les conclusions de l'analyse de variance de chacun des composites. Il apparaît que $F_0 < F_{0.05,3,16}$ dans les deux cas, et que l'hypothèse H_0 est donc vraie. De plus, la méthode LSD conclut qu'il n'y a pas de différence notable entre les divers nombres de cycles de gel-dégel (annexe B, section B.1). Les figures 4.6 et 4.7 confirment ces conclusions. L'analyse des résidus présentée à l'annexe B (section B.2) confirme la validité de l'analyse statistique.

4.4.3 Effet sur le module élastique

La procédure de calcul pour le module élastique est celle présentée à la section 4.3.3. Les tableaux 4.19 et 4.21 présentent les valeurs du module élastique pour les échantillons de carbone

et de verre. Une analyse de variance a été effectuée avec les hypothèses suivantes (niveau de signification de 95 %) :

H_0 : la valeur moyenne du module élastique est la même quelque soit le nombre de cycles de gel-dégel.

H_1 : le nombre de cycles de gel-dégel influence la valeur moyenne du module élastique du composite.

Les tableaux 4.20 et 4.22 résument les conclusions de l'analyse de variance de chacun des composites. Il apparaît que $F_0 < F_{0.05,3,16}$ dans les deux cas et on conclut que le nombre de cycles de gel-dégel n'a aucune influence sur la valeur moyenne du module élastique pour ces deux types de composite.

De même, la méthode LSD nous informe qu'il n'y a pas de différence importante de résistance après une augmentation du nombre de cycles de gel-dégel (annexe B, section B.1). Les figures 4.8 et 4.9 confirment ces conclusions. On remarque cependant la grande variabilité des résultats expérimentaux présentés dans ces figures. La validité de l'analyse statistique est confirmée par l'analyse des résidus présentée à l'annexe B (section B.2).

4.5 Conclusions

Cette expérimentation avait pour objectif de déterminer l'effet de la température et du gel-dégel sur les propriétés élastiques des matériaux composites. Une analyse statistique nommée analyse de variance a été effectuée sur ces données. Les conclusions suivantes ont pu être tirées à la suite de cette analyse :

- À une température de 60 °C, la résistance ultime et la rigidité des deux matériaux testés subissent une baisse importante. Pour le carbone/époxy, seule la contrainte ultime a subi une diminution de 30 % alors que pour le verre-E/époxy, les diminutions relatives à la contrainte ultime et au module élastique sont respectivement de 45 % et de 20 %. Dans les deux cas, il semble que c'est la résine époxy qui provoque cet effet.

- Même sous le point de congélation, la contrainte ultime et la rigidité des matériaux composites ne sont pas affectées.
- Les cycles de gel-dégel n'ont aucune influence négative sur la contrainte ultime et la rigidité des composites testés.
- Un écart important est observé dans les résultats entre les lamelles pour certains niveaux de température mais plus particulièrement aux niveaux des cycles de gel-dégel. Il est difficile d'en pointer la cause avec exactitude. Toutefois, cette constatation indique que la technique d'expérimentation et/ou le procédé de fabrication devrait faire l'objet d'une attention particulière. Aussi, un pourcentage de fibres plus élevé permettrait d'obtenir de meilleures propriétés élastiques.

Tableau 4.1 - Données typiques pour un test à un seul facteur

Traitement (niveau)		Observations					Totaux	Moyennes
1	y_{11}	y_{11}	.	.	.	y_{1n}	$y_{1.}$	$\bar{y}_{1.}$
2	y_{21}	y_{22}	.	.	.	y_{2n}	$y_{2.}$	$\bar{y}_{2.}$
.
.
.
a	y_{a1}	y_{a2}	.	.	.	y_{an}	$y_{a.}$	$\bar{y}_{a.}$
							$y_{..}$	$\bar{y}_{..}$

Tableau 4.2 - Sommaire de l'analyse de variance pour un seul facteur, modèle à effet fixe

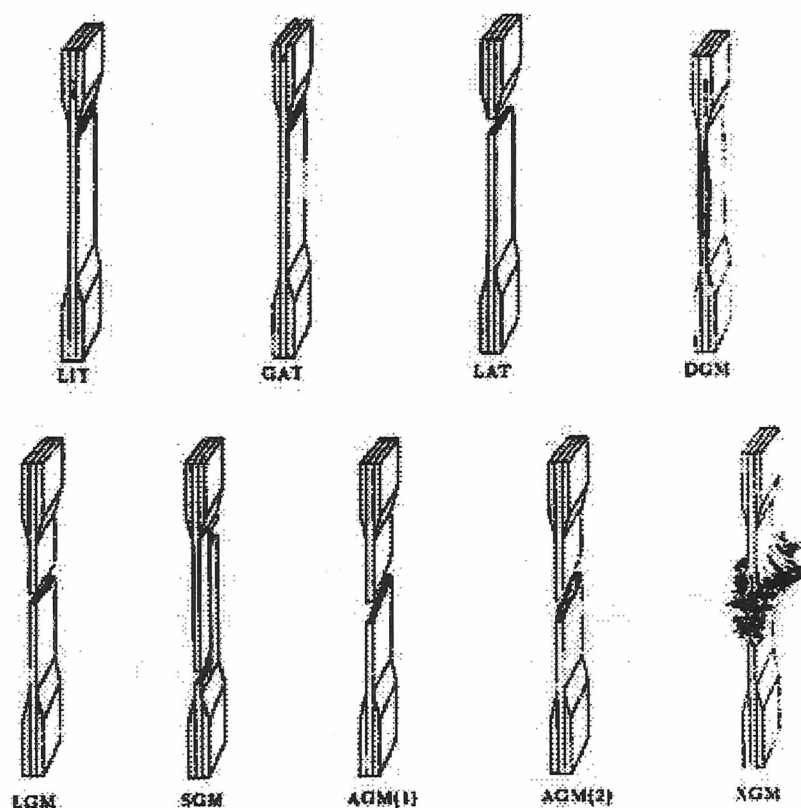
Sources des variations	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	F_0
Entre traitements	$SS_{\text{Traitements}}$	$a - 1$	$MS_{\text{Traitements}}$	$F_0 = \frac{MS_{\text{Traitements}}}{MS_E}$
À l'intérieur des traitements	SS_E	$N - a$	MS_E	
Total	SS_T	$N - 1$		

Tableau 4.3 - Résultats expérimentaux du carbone/époxy à diverses températures

Température (°C)	Échantillon	t_c (mm)	A_c (mm ²)	$P_{c \max}$ (kN)	$\sigma_{c \max}$ (MPa)	Mode de rupture
-40	A	1,56	23,40	19,571	836,37	L A T
	B	1,70	25,50	21,992	862,43	S G M
	C	1,62	24,30	22,128	910,62	S G M
	D	1,73	25,95	24,651	949,94	S G M
	E	1,40	21,00	20,206	962,19	L A T
-20	A	1,85	27,75	18,993	684,43	L A T
	B	1,61	24,15	20,532	850,19	S G M
	C	1,53	22,95	22,068	961,57	L G M
	D	1,76	26,40	21,228	804,09	S G M
	E	1,67	25,05	21,075	841,32	S G M
4	A	1,70	25,50	20,096	788,08	S G M
	B	1,54	23,10	19,902	861,56	L A B
	C	1,68	25,20	19,379	769,01	S G M
	D	1,77	26,55	22,606	851,45	S G M
	E	1,58	23,70	19,823	836,41	L G M
21	A	1,60	24,00	23,182	965,92	L G M
	B	1,60	24,00	21,696	904,00	S G M
	C	1,67	25,05	21,668	864,99	L A T
	D	1,81	27,15	23,148	852,60	L A T
	E	1,84	27,60	22,429	812,64	S G M
38	A	1,81	27,15	23,543	867,13	L A T + L A B
	B	1,62	24,30	21,337	878,07	S G M
	C	1,68	25,20	23,394	928,33	S G M
	D	1,79	26,85	22,745	847,11	L A T + L A B
	E	1,58	23,70	18,799	793,21	L A T + L A B
60	A	1,60	24,00	15,289	637,04	S G M
	B	1,53	22,95	17,734	772,72	L A B
	C	1,67	25,05	14,595	582,63	L G M
	D	1,58	23,70	11,719	494,47	L A T
	E	1,65	24,75	13,207	533,62	S G M

Tableau 4.4 - Résultats expérimentaux du verre-E/époxy à diverses températures

Température (°C)	Échantillon	t_c (mm)	A_c (mm ²)	$P_{c \max}$ (kN)	$\sigma_{c \max}$ (MPa)	Mode de rupture
-40	A	2,20	55,00	31,589	574,35	X G M
	B	2,20	55,00	32,053	582,78	X G M + L A T
	C	2,05	51,25	21,089	411,49	X G M + L A T
	D	2,18	54,50	28,086	515,34	X G M + L A T
	E	2,35	58,75	27,688	471,29	X G M + L A B
-20	A	2,20	55,00	29,495	536,27	X G M
	B	2,30	57,50	30,341	527,67	X G M
	C	2,10	52,50	29,782	567,28	X G M + L A T
	D	2,10	52,50	28,839	549,31	X G M + L A T
	E	2,10	52,50	27,371	521,35	X G M + L A B
4	A	2,00	50,00	26,255	525,10	L A T + L A B
	B	2,15	53,75	27,952	520,04	X G M + L A T
	C	2,20	55,00	22,575	410,45	X G M + L A B
	D	2,40	60,00	26,739	445,65	X G M + L A T
	E	2,25	56,25	28,010	497,96	X G M
21	D	2,23	55,75	25,252	452,95	L A T
	E	2,20	55,00	27,827	505,95	S G M
	G	2,16	54,00	25,892	479,48	L A T
	H	2,18	54,50	25,531	468,46	X G M
	I	2,45	61,25	26,807	437,67	X G M
38	A	2,34	58,50	22,925	391,88	X G M
	B	2,12	53,00	27,589	520,55	L A B
	C	2,27	56,75	24,584	433,20	L A T
	D	2,23	55,75	26,789	480,52	X G M
	E	2,28	57,00	25,463	446,72	L G M + L A B
60	A	2,24	56,00	13,871	247,70	S G V
	B	2,22	55,50	15,196	273,80	L A T
	C	2,18	54,50	13,948	255,93	L I T
	D	2,18	54,50	13,973	256,39	L A B
	E	2,13	53,25	16,859	316,60	L A B



Première lettre		Deuxième lettre		Troisième lettre	
Type de rupture	Code	Section de la rupture	Code	Localisation de la rupture	Code
Angulaire / <i>Angled</i>	A	Int. mâchoire/talon / <i>Inside grip/tab</i>	I	Bas / <i>Bottom</i>	B
Délamination / <i>edge Delamination</i>	D	À mâchoire/au talon / <i>At grip/tab</i>	A	Haut / <i>Top</i>	T
Talon/mâchoire / <i>Grip/tab</i>	G	< que largeur lamelle à mâchoire/au talon	W	Gauche / <i>Left</i>	L
Latérale / <i>Lateral</i>	L	< 1W from grip/tab		Droite / <i>Right</i>	R
Multi-mode / <i>Multi-mode</i>	M (xyz)	Portion centrale / <i>Gage</i>	G	Milieu / <i>Middle</i>	M
Cisaillement long. / <i>long. Splitting</i>	S	Sections multiples / <i>Multiple areas</i>	M	Diverses / <i>Various</i>	V
Explosif / <i>eXplosive</i>	X	Diverses / <i>Various</i>	V	Inconnue / <i>Unknown</i>	U
Autre / <i>Other</i>	O	Inconnue / <i>Unknown</i>	U		

Figure 4.1 - Représentation des modes de rupture selon la norme ASTM D3039

Tableau 4.5 - Contrainte ultime du carbone/époxy à diverses températures

Groupe d'échantillons	Contrainte ultime (MPa)					Total y_i	Moyenne \bar{y}_i	Écart-type
A	B	C	D	E				
1 (-40°C)	836,4	862,4	910,6	949,9	962,2	4521,5	904,3	54,4
2 (-20°C)	684,4	850,2	961,6	804,1	841,3	4141,6	828,3	99,6
3 (4°C)	788,1	861,6	769,0	851,5	836,4	4106,5	821,3	40,6
4 (21°C)	965,9	904,0	865,0	852,6	812,6	4400,1	880,0	58,0
5 (38°C)	867,1	878,1	928,3	847,1	793,2	4313,8	862,8	49,1
6 (60°C)	637,0	772,7	582,6	494,5	533,6	3020,5	604,1	108,4
						$y_{..} = 24504,1$	$\bar{y}_{..} = 816,8$	

Tableau 4.6 - Analyse de variance de la contrainte ultime du carbone/époxy à diverses températures

Source des variations	Somme des carrés	Degré de lib.	Moy. des carrés	F_o	$F_{\alpha, v1, v2}$
Entre Groupes	295821.78	5	59164.36	11.08	2.62
A l'intérieur des groupes	128203.65	24	5341.82		
Total	424025.44	29			

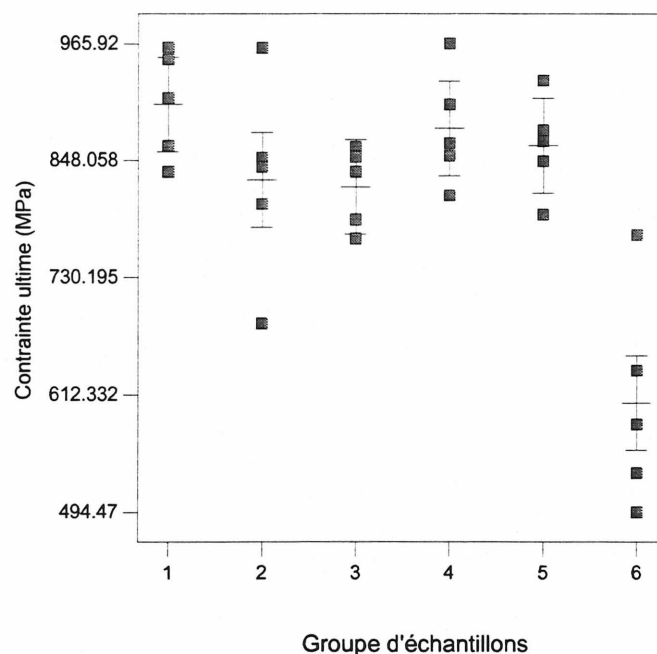
**Figure 4.2** - Contrainte ultime du carbone/époxy selon le groupe d'échantillons (température)

Tableau 4.7 - Contrainte ultime du verre-E/époxy à diverses températures

Groupe d'échantillons	Contrainte ultime (MPa)					Moyenne \bar{y}_i	Écart-type
	A	B	C	D	E		
1 (-40°C)	574,3	582,8	411,5	515,3	471,3	511,0	71,9
2 (-20°C)	536,3	527,7	567,3	549,3	521,4	540,4	18,3
3 (4°C)	525,1	520,0	410,5	445,7	498,0	479,8	49,9
4 (21°C)	453,0	505,9	479,5	468,5	437,7	468,9	26,1
5 (38°C)	391,9	520,5	433,2	480,5	446,7	454,6	48,7
6 (60°C)	247,7	273,8	255,9	256,4	316,6	270,1	27,7

Tableau 4.8 - Analyse de variance de la contrainte ultime du verre-E/époxy à diverses températures

Source des variations	Somme des carrés	Degré de lib.	Moy. des carrés	F_o	$F_{\alpha, v1, v2}$
Entre Groupes	227156.1611	5	45431.23221	23.08	2.62
A l'intérieur des groupes	47238.75904	24	1968.281627		
Total	274394.9201	29			

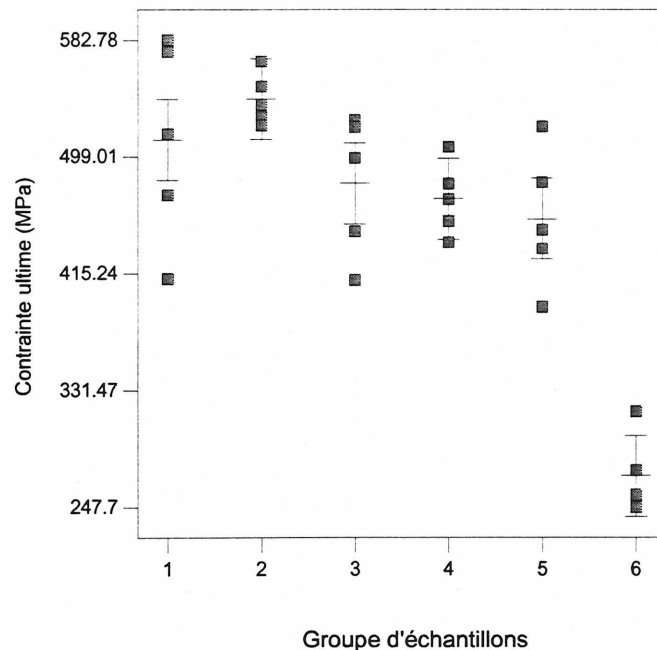


Figure 4.3 - Contrainte ultime du verre-E/époxy selon le groupe d'échantillons (température)

Tableau 4.9 - Module élastique du carbone/époxy à diverses températures

Groupe d'échantillons	Module élastique					Moyenne \bar{y}_i	Écart-type
	A	B	C	D	E		
1 (-40°C)	67055	57492	63837	63413	70156	64391	4722
2 (-20°C)	53907	61166	69373	60229	62798	61495	5546
3 (4°C)	67738	69264	63279	63955	62464	65340	2983
4 (21°C)	74248	70265	69268	62320	62431	67706	5211
5 (38°C)	61984	68396	67739	62112	64145	64875	3047
6 (60°C)	64882	67834	56534	55994	53064	59662	6340

Tableau 4.10 - Analyse de variance du module élastique du carbone/époxy à diverses températures

Source des variations	Somme des carrés	Degré de lib.	Moy. des carrés	F_o	$F_{\alpha, v1, v2}$
Entre Groupes	207515941.6	5	41503188.32	1.80	2.62
A l'intérieur des groupes	554374447.6	24	23098935.32		
Total	761890389.2	29			

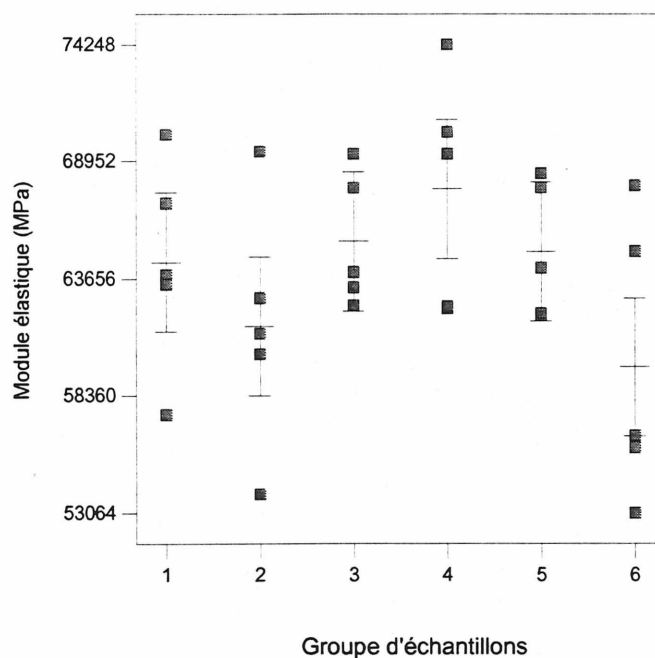


Figure 4.4 - Module élastique du carbone/époxy selon le groupe d'échantillons (température)

Tableau 4.11 - Module élastique du verre-E/époxy à diverses températures

Groupe d'échantillons	Module élastique (MPa)					Moyenne \bar{y}_i	Écart-type
	A	B	C	D	E		
1 (-40°C)	25122	27839	27811	26966	24815	26511	1455
2 (-20°C)	26077	25764	28807	28019	27191	27172	1282
3 (4°C)	30135	27150	24243	23008	25623	26032	2766
4 (21°C)	24376	24362	27253	27990	23962	25589	1881
5 (38°C)	23200	25784	24169	25031	24803	24597	971
6 (60°C)	20103	19697	21381	20581	20411	20435	627

Tableau 4.12 - Analyse de variance du module élastique du verre-E/époxy à diverses températures

Source des variations	Somme des carrés	Degré de lib.	Moy. des carrés	F_o	$F_{\alpha, v1, v2}$
Entre Groupes	146975622.6	5	29395124.51	10.83	2.62
A l'intérieur des groupes	65139690.8	24	2714153.78		
Total	212115313.4	29			

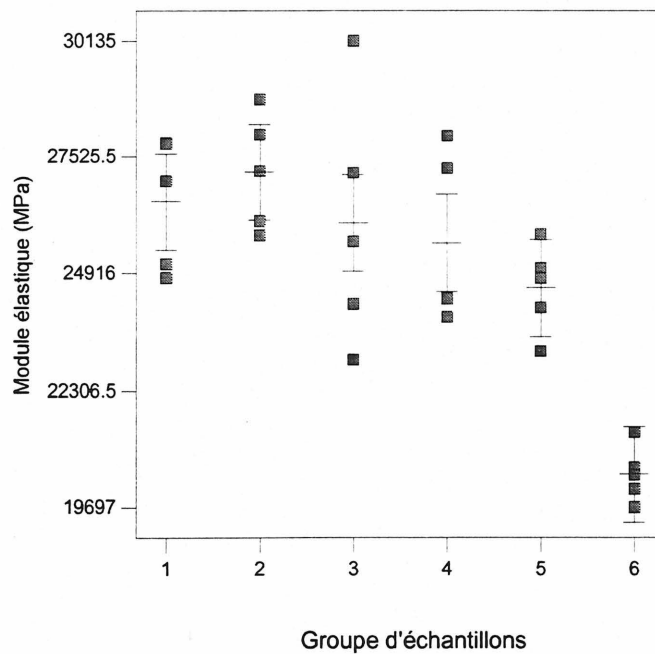


Figure 4.5 - Module élastique du verre-E/époxy selon le groupe d'échantillons (température)

Tableau 4.13 - Résultats expérimentaux du carbone/époxy selon le nombre de cycles de gel-dégel

Cycles	Échantillon	t_c (mm)	A_c (mm ²)	$P_{c \max}$ (kN)	$\sigma_{c \max}$ (MPa)	Mode de rupture
0	1	3,20	48,00	19,532	406,92	LIB + LAT
	2	2,73	40,95	23,168	565,76	LIT + LAB
	3	2,80	42,00	25,678	611,38	LAB
	4	3,15	47,25	23,693	501,44	LIB + LAT
	5	2,75	41,25	18,619	451,37	LWT + LAB
300	1	2,95	44,25	20,234	457,27	LAT
	2	3,35	50,25	21,642	430,69	LWB + LIT
	3	2,90	43,50	22,029	506,41	LAT
	4	3,08	46,20	17,698	383,07	LIT
	5	3,15	47,25	20,341	430,50	LAT + LIB
600	1	2,85	42,75	20,546	480,61	LAB + LIT
	2	2,85	42,75	20,936	489,73	LAT + LIB
	3	2,70	40,50	22,143	546,74	LIB + LAT
	4	3,20	48,00	19,337	402,85	LAT + LAB
	5	3,00	45,00	20,499	455,53	LAB + LIT
900	1	2,55	38,25	23,773	621,52	LAT + LAB
	2	2,55	38,25	18,643	487,40	LAB + LIT
	3	3,02	45,30	20,161	445,06	LIB
	4	2,95	44,25	19,548	441,76	LIB
	5	3,22	48,30	23,045	477,12	LAT + LAB

Tableau 4.14 - Résultats expérimentaux du verre-E/époxy selon le nombre de cycles de gel-dégel

Cycles	Échantillon	t_c (mm)	A_c (mm ²)	$P_{c \max}$ (kN)	$\sigma_{c \max}$ (MPa)	Mode de rupture
0	1	2,24	33,60	15,330	456,250	L A T
	2	2,27	34,05	10,186	299,148	L A T
	3	2,32	34,80	16,433	472,213	L A T
	4	2,14	32,10	16,616	517,632	S G M
	5	2,31	34,65	16,378	472,670	S G M
300	1	2,29	34,35	16,314	474,934	L A T
	2	2,18	32,70	17,392	531,865	S M V
	3	2,07	31,05	16,599	534,589	G I T
	4	2,32	34,80	17,087	491,006	L A B
	5	2,20	33,00	15,458	468,424	L A B
600	1	2,20	33,00	14,695	445,303	L A T
	2	2,15	32,25	13,642	423,008	L A T
	3	2,31	34,65	13,987	403,665	L A T
	4	2,27	34,05	15,160	445,228	L A T
	5	--	--	--	--	--
900	1	2,23	33,45	16,619	496,831	S G M
	2	2,10	31,50	15,178	481,841	L A B
	3	2,31	34,65	15,418	444,964	G U U
	4	2,15	32,25	15,868	492,031	L A B
	5	2,19	32,85	15,642	476,164	L A B

Tableau 4.15 - Contrainte ultime du carbone/époxy après des cycles de gel-dégel

Groupe d'échantillons	Contrainte ultime (MPa)					Moyenne \bar{y}_i	Écart-type
	1	2	3	4	5		
1 (zéro)	406,9	565,8	611,4	501,4	451,4	507,4	82,9
2 (300)	457,3	430,7	506,4	383,1	430,5	441,6	45,0
3 (600)	480,6	489,7	546,7	402,9	455,5	475,1	52,4
4 (900)	621,5	487,4	445,1	441,8	477,1	494,6	73,7

Tableau 4.16 - Analyse de variance de la contrainte ultime du carbone/époxy après des cycles de gel-dégel

Source des variations	Somme des carrés	Degré de lib.	Moy. des carrés	F_o	$F_{\alpha, v1, v2}$
Entre Groupes	12303.89	3	4101.30	0.96	3.24
A l'intérieur des groupes	68294.74	16	4268.42		
Total	80598.63	19			

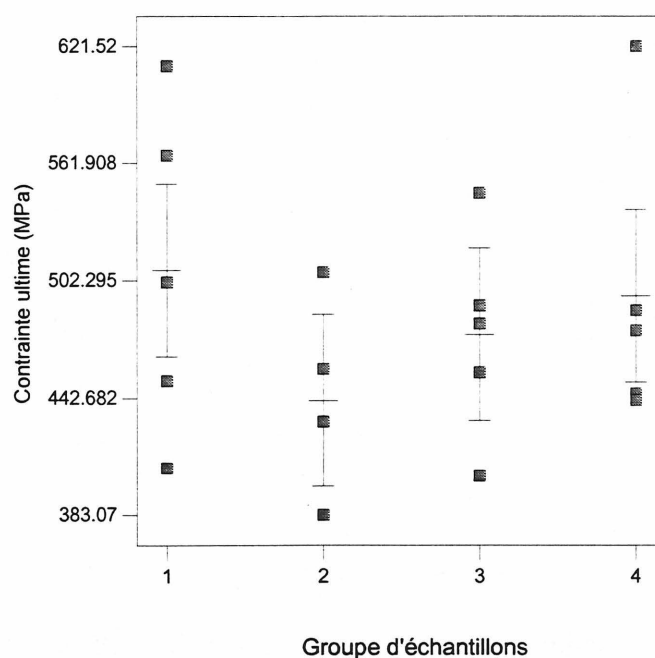
**Figure 4.6** - Contrainte ultime du carbone/époxy selon le groupe d'échantillons (cycles de gel-dégel)

Tableau 4.17 - Contrainte ultime du verre-E/époxy après des cycles de gel-dégel

Groupe d'échantillons	Contrainte ultime (MPa)					Moyenne \bar{y}_i	Écart-type
1	2	3	4	5			
1 (zéro)	456,3	299,1	472,2	517,6	472,7	443,6	83,9
2 (300)	474,9	531,9	534,6	491,0	468,4	500,2	31,3
3 (600)	445,3	423,0	403,7	445,2		429,3	20,1
4 (900)	496,8	481,8	445,0	492,0	476,2	478,4	20,4

Tableau 4.18 - Analyse de variance de la contrainte ultime du verre-E/époxy après des cycles de gel-dégel

Source des variations	Somme des carrés	Degré de lib.	Moy. des carrés	F_o	$F_{\alpha, v1, v2}$
Entre Groupes	14464.26	3	4821.42	2.07	3.29
A l'intérieur des groupe	34955.57	15	2330.37		
Total	49419.82	18			

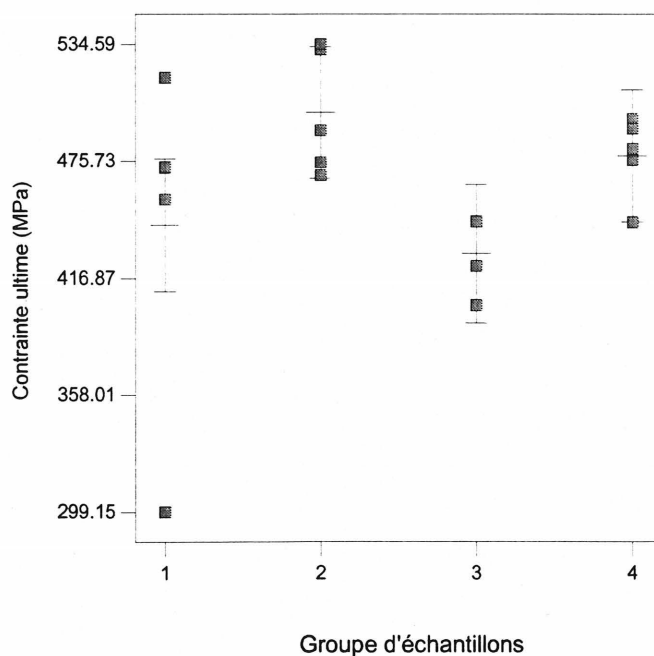
**Figure 4-7** - Contrainte ultime du verre-E/époxy selon le groupe d'échantillons (cycles de gel-dégel)

Tableau 4.19 - Module élastique du carbone/époxy après des cycles de gel-dégel

Groupe d'échantillons	Module élastique (MPa)					Moyenne \bar{y}_i	Écart-type
	1	2	3	4	5		
1 (zéro)	35265	43725	41379	39151	35982	39100	3571
2 (300)	39143	37652	39792	38124	36293	38201	1357
3 (600)	42346	40289	42573	32563	37298	39014	4182
4 (900)	41910	42138	37905	39209	36227	39478	2555

Tableau 4.20 - Analyse de variance du module élastique du carbone/époxy après des cycles de gel-dégel

Source des variations	Somme des carrés	Degré de lib.	Moy. des carrés	F_o	$F_{\alpha, v1, v2}$
Entre Groupes	4332755.6	3	1444251.87	0.15	3.24
A l'intérieur des groupes	154442955.6	16	9652684.72		
Total	158775711.2	19			

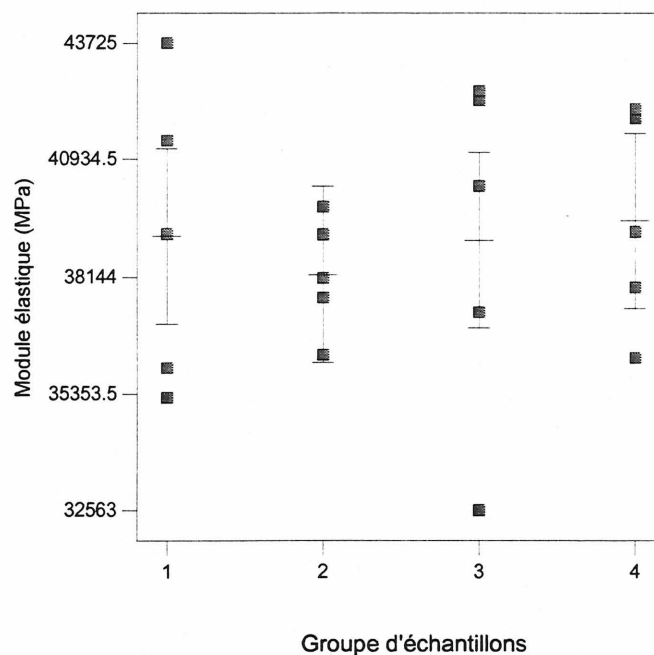
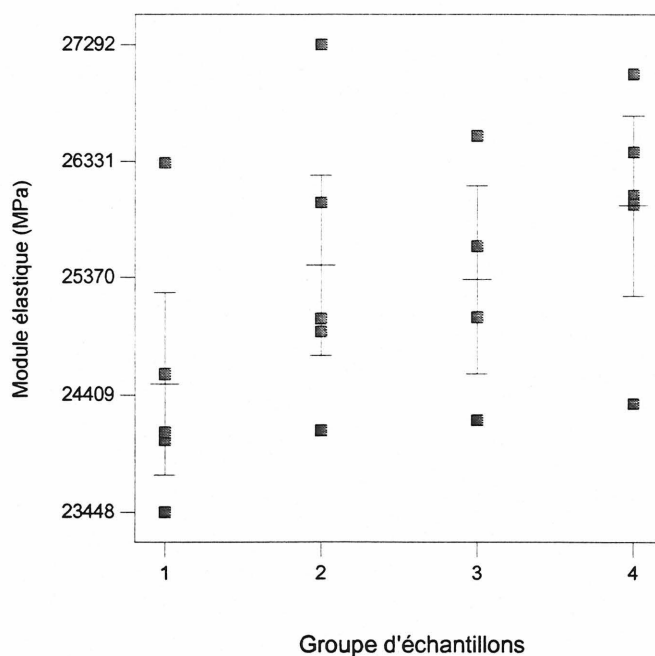
**Figure 4.8** - Module élastique du carbone/époxy selon le groupe d'échantillons (cycles de gel-dégel)

Tableau 4.21 - Module élastique du verre-E/époxy après des cycles de gel-dégel

Groupe d'échantillons	Module élastique (MPa)					Moyenne \bar{y}_i	Écart-type
1	2	3	4	5			
1 (zéro)	24577	24038	24103	26318	23448	24497	1094
2 (300)	24117	25985	27292	24925	25031	25470	1215
3 (600)	25624	26543	25044	24203		25354	984
4 (900)	26046	26409	24340	25971	27049	25963	1002

Tableau 4.22 - Analyse de variance du module élastique du verre-E/époxy après des cycles de gel-dégel

Source des variations	Somme des carrés	Degré de lib.	Moy. des carrés	F_o	$F_{\alpha, v1, v2}$
Entre Groupes	5572509.99	3	1857503.33	1.58	3.29
A l'intérieur des groupe	17620937.80	15	1174729.19		
Total	23193447.79	18			

**Figure 4.9** - Module élastique du verre-E/époxy selon le groupe d'échantillons (cycles de gel-dégel)

Chapitre 5

PROCÉDURES D'ESSAIS SUR L'INTERFACE COMPOSITE-BÉTON

Les réparations et les renforcements de structures existantes avec des matériaux composites, tel que mentionné dans l'introduction de ce mémoire, impliquent que ces matériaux soient collés à des surfaces de béton pour reprendre ainsi une partie des efforts sur la structure. Il n'en demeure pas moins qu'à la suite d'une série d'expositions à des intempéries, la qualité de l'adhérence entre le béton et le matériau composite risque d'être affectée. Le programme expérimental a été élaboré ici de manière à étudier les effets des conditions environnementales, telles que rencontrées au Québec et au Canada, les plus susceptibles d'affecter cette technique de réhabilitation. Par exemple, nos ouvrages d'art font face à des conditions climatiques très variables d'une saison à une autre. Les cycles de gel-dégel se produisent sur une longue période de l'année; l'alternance de périodes de pluie et de neige produit un environnement humide qui peut mener à la modification des performances mécaniques des matériaux composites ou de leur adhérence à la surface de support. C'est pourquoi des essais de vieillissement accéléré par des cycles de gel-dégel et de mouillage-séchage ont été effectués en laboratoire afin de reproduire ces conditions.

Cet aspect de la durabilité, traité dans ce mémoire de maîtrise, vise principalement le renforcement des poutres en béton armé. Pour obtenir des éléments de réponse sur la qualité de l'adhérence, deux types d'essais ont été effectués. Des poutres de petites tailles (100 mm x 150 mm x 1215 mm) ont été soumises à un essai de flexion. L'objectif de cette opération est de vérifier si la capacité des poutres semble être affectée à la suite de l'exposition cyclique. L'autre essai effectué est un essai d'arrachement à partir d'un bloc de béton. Avec cet essai, en plus de vérifier plus directement le comportement de l'interface, l'objectif est d'établir une corrélation

avec le comportement des poutres soumises à des conditions environnementales identiques. En effet, si une telle corrélation était établie, elle permettrait de réaliser les essais de vieillissement accéléré sur des éléments structuraux de plus petites dimensions que les poutres décrites tout juste auparavant.

5.1 Cycles de mouillage-séchage

Les chercheurs cités dans la revue des ouvrages publiés présentée au chapitre 2, dont CHAJES et coll. (1995), KARBHARI et ENGINEER (1996) et TOUTANJI et GOMEZ (1997), ont étudié cet aspect de la durabilité sur quelques produits en matériaux composites collés sur des poutres ayant une longueur inférieure ou égale à 330 mm. Dans le cadre du présent programme expérimental, des poutres de plus grandes dimensions, soit 1215 mm de longueur, et des blocs de béton ont été utilisés. De plus, la présente étude diffère des précédentes par les matériaux composites testés, par la méthode d'exposition, ainsi que par sa durée.

Alors, pour effectuer une simulation accélérée des conditions *in situ* susceptibles d'affecter les ouvrages d'art, comme le ruissellement d'eau causé par un mauvais joint ou un drainage déficient, l'aspersion d'eau par le trafic, ou la variation de l'humidité ambiante, nous avons opté pour des cycles de mouillage-séchage. Les études réalisées sur la propriété d'absorption des matériaux composites démontrent que ce mécanisme de diffusion est très lent. C'est pourquoi l'intérêt de cette nouvelle étude est de soumettre les échantillons, en milieu humide, beaucoup plus longtemps et selon un cycle permettant une amplification considérable de l'endommagement causé par l'humidité.

5.1.1 Description des échantillons

Quatorze poutres en béton armé de 100 mm x 150 mm x 1215 mm ont été fabriquées pour cette exposition. L'armature longitudinale en tension est constituée de deux barres lisses de 6,5 mm de diamètre procurant ainsi une aire totale de 65 mm². Cette quantité d'acier est légèrement supérieure à l'aire minimale requise par la norme canadienne CSA A23.3-94. Pour l'armature transversale, des barres de 6,5 mm de diamètre ont aussi été utilisées. L'espacement des étriers a

été déterminé de manière à éviter une rupture due à l'effort tranchant. De plus, les poutres possèdent deux barres d'armature de 6,5 mm dans la zone comprimée. La configuration de l'acier d'armature des poutres est représentée à la figure 5.1. Ces tiges d'armature lisses provenaient d'un lot d'acier laminé à chaud. Les limites élastiques et ultimes ont été déterminées à la suite d'un essai de traction uniaxial sur cinq échantillons et les valeurs obtenues sont de 450 MPa pour la limite élastique, et de 550 MPa pour la limite ultime. Les courbes caractéristiques de cet acier sont présentées à la figure 5.2.

Un total de 27 blocs en béton de 150 mm x 150 mm x 400 mm ont été fabriqués pour cette série d'essais. Ces dimensions sont recommandées pour que le montage utilisé fonctionne adéquatement.

Quatre coulées de béton (#1, 2, 4 et 5) ont servi à la construction des échantillons poutres et blocs. Un béton ayant une résistance spécifiée à 28 jours de 35 MPa a été obtenu d'un fournisseur local. La grosseur maximale des granulats était de 10 mm. Les caractéristiques des bétons frais sont présentées au tableau 5.1. Après leur fabrication, les poutres et les blocs ont subi une cure humide de 14 jours. Parmi les cylindres de béton prélevés lors des coulées, certains ont été conservés dans les conditions ambiantes du laboratoire, tandis que d'autres ont subi la même exposition aux cycles de mouillage-séchage que les échantillons poutres et blocs. La résistance en compression des cylindres a été évaluée le jour même des essais de flexion et d'arrachement et les valeurs obtenues sont résumées au tableau 5.2. Il importe de souligner qu'aucune différence significative n'a été observée entre les bétons avec les conditions ambiantes et ceux avec les cycles de mouillage-séchage. Lors de ces essais, la résistance moyenne en compression des cylindres était de 49 MPa.

5.1.2 Installation des matériaux composites

Avant de procéder à l'installation des matériaux composites sur les éléments de béton, une bonne préparation de la surface de support est nécessaire. Ainsi, la face tendue des poutres de même qu'une face des blocs ont été traitées au jet de sable, de manière à enlever la laitance du béton et à découvrir légèrement la surface des granulats. Il est à noter que cette opération a été effectuée

par un entrepreneur local. Le renforcement externe en flexion de douze poutres s'est effectué avec deux produits en fibres de carbone et deux poutres sans renforcement externe servent de référence à des fins de comparaison. Tandis que sur les blocs, les mêmes produits en fibres de carbone ont été utilisés, mais en plus, un produit en fibres de verre a aussi été employé pour l'étude. Les paragraphes suivants décrivent les produits utilisés et leur configuration.

a) Replark 20

Le produit a déjà été présenté au chapitre 3, à la section 3.2.1, et consiste en des feuilles préimprégnées de fibres de carbone et d'une résine à base d'époxy (type L700S). Les propriétés et particularités associées à ce produit sont présentées aux tableaux 3.1 et 3.2. Un apprêt (PS401) a été appliqué aux surfaces de béton 12 heures avant la pose du matériau composite.

La quantité de renforcement en matériau composite a été déterminée selon la capacité de la poutre de béton. Un des critères observés était que le matériau composite soit sollicité jusqu'à sa rupture en traction. Ainsi, s'il y a modification du comportement du matériau composite à la suite de l'imposition des cycles, ce sera sans doute plus manifeste. Pour répondre à ce critère, il faut alors prévoir un ancrage suffisant pour éviter un délaminage prématuré. Un autre critère plutôt empirique était que le renforcement de composites soit réparti sur au moins deux couches.

Six poutres ont été renforcées avec ce produit de Mitsubishi. Les poutres ont été renforcées avec deux feuilles de 50 mm de largeur, sur une longueur de 1060 mm. Le produit Fibrwrap, en fibres de verre, a été collé aux extrémités afin de prévenir le délaminage du Replark. Les détails de ce renforcement sont montrés à la figure 5.3. Une cure de 12 jours a été observée avant le début des cycles de mouillage-séchage.

L'application de ce produit sur la face des blocs a été basée sur une technique développée par Bizindavyi et Neale (1997). La longueur de collage a été déterminée de manière à ce que le délaminage du composite survienne tout juste avant sa rupture en traction. Ainsi, pour une lamelle ayant deux couches de 50 mm de fibres de carbone et de résines époxy, une longueur de 240 mm a été considérée pour l'essai. La configuration du collage sur les blocs est illustrée à la

figure 5.4. Enfin, après l'installation des composites, une cure de 12 jours a précédé le début des cycles de mouillage-séchage.

b) Carbodur S

Les lamelles de plastique, extrudées par tirage et renforcées de fibres de carbone, ont été employées avec un mortier adhésif à base d'époxy fabriqué par la compagnie Sika. Ce produit se distingue du produit précédent, car les lamelles sont préfabriquées en industrie et possèdent des dimensions bien spécifiques. Les propriétés et caractéristiques du mortier et des lamelles sont données aux tableaux 5.3 et 5.4.

Avec la quantité prédéterminée de renforcement externe, la section et la portée de la poutre ont imposé la configuration particulière de collage de ce composite. Ainsi, les lamelles de Carbodur de 50 mm de largeur ont été collées sur une longueur de 400 mm, à chaque extrémité des poutres avec le mortier adhésif Sikadur 30, laissant ainsi une longueur de 260 mm libre au centre de la poutre. Cette configuration a été choisie de manière à éviter la rupture par écrasement du béton. De plus, cela nous permettait vraiment de vérifier les propriétés de l'interface à la suite de l'exposition donnée, puisqu'une rupture par délaminage était anticipée. Le désavantage de cette configuration est que le matériau composite n'est pas sollicité jusqu'à sa contrainte ultime de rupture. Six poutres ont été renforcées avec ce produit et les détails de ce renforcement sont montrés à la figure 5.5. Ces poutres renforcées ont subi une cure de 12 jours avant le début de l'exposition.

Pour ce qui est de la longueur de collage disponible sur un bloc, celle-ci a été limitée à 300 mm. Cette longueur est nettement inférieure à la longueur de développement provoquant une rupture en traction du composite. Or, l'intérêt recherché de cet essai est de vérifier s'il y a endommagement de l'interface à la suite de l'exposition aux cycles, et quelle que soit la longueur collée, s'il y a modification des propriétés de l'interface, celle-ci devrait être perceptible. La configuration du collage sur les blocs est illustrée à la figure 5.6. Après l'installation des composites, une cure de 12 jours a précédé le début des cycles mouillage-séchage.

c) Fibrwrap

Ce matériau a déjà été présenté au chapitre 3 à la section 3.2.1 et consiste en un tissé sec en fibres de verre avec de la résine à base d'époxy (Tyfo S). Les tableaux 3.3 et 3.4 présentent les propriétés et les caractéristiques de chacun des composants de ce produit.

Dans le même ordre d'idée qu'avec le Replark, la longueur de collage a été déterminée de manière à ce que le délaminage du composite survienne tout juste avant sa rupture en traction. Ainsi, pour une lamelle ayant deux couches de 25 mm de fibres et de résine, une longueur de 240 mm a été considérée pour l'essai. La configuration du collage sur les blocs est illustrée à la figure 5.7. Aussi, après l'installation des composites, une cure de 12 jours a précédé le début des cycles mouillage-séchage.

5.1.3 Exposition

Lors de la planification de cette étude, aucune norme ni guide d'essai n'était disponible pour baser et développer ce programme expérimental en ce qui concerne le mouillage-séchage. Alors, sur la base de la documentation, une procédure d'essai a été développée et se distingue, entre autres choses, par la durée prolongée de son cycle, soit d'une semaine. Un cycle complet de mouillage-séchage comprend cinq jours d'immersion dans l'eau à 21 °C, suivis de deux jours de séchage dans un milieu à 27 °C, où la circulation d'air est assurée par des ventilateurs.

Au tableau 5.2, on indique les caractéristiques des spécimens, poutres et blocs, qui ont été soumis à l'exposition cyclique et de ceux qui sont demeurés dans les conditions ambiantes du laboratoire servant de référence. Les tests de flexion et d'arrachement ont été effectués après 13 (3 mois) et 26 cycles (6 mois) de mouillage-séchage. Puisqu'il s'agissait d'une nouvelle orientation de recherche sur cet aspect de la durabilité et compte tenu de l'amplification considérable du mouillage-séchage à l'exposition réelle des structures, le nombre de cycles effectués a été considéré suffisant dans le contexte de cette étude.

5.1.4 Essai de flexion sur les poutres

L'objectif de cet essai est de vérifier si la capacité des poutres est affectée à la suite de l'exposition cyclique. À la fin de leurs expositions, les poutres ont été chargées de façon quasi-

statique avec une presse (Baldwin, 60000 lbs de capacité) jusqu'à la rupture. La portée des poutres sur appuis simples était de 1100 mm et les deux charges concentrées étaient espacées de 300 mm. La figure 5.8 présente un aperçu du montage expérimental. Le taux de chargement a été contrôlé manuellement et a été sensiblement le même pour chacune des poutres. Au niveau de l'instrumentation, la flèche au centre a été mesurée à l'aide d'un LVDT, et trois types de jauges électriques ont permis de mesurer les déformations unitaires sur le béton, l'acier d'armature et le composite :

- sur le béton : N2A-06-20CBW-120 (52,0 mm par 4,8 mm)
- sur l'acier : CEA-06-125UN-120 (3,2 mm par 2,5 mm)
- sur le composite : CEA-06-250-UW-120 (6,4 mm par 4,6 mm)

Toutes les lectures ont été prises automatiquement à l'aide du système d'acquisition de données DORIC 245 à intervalles réguliers (cinq secondes) et compilées dans un fichier informatique.

Les données recueillies au sujet des déformations du béton, de l'acier et du composite, ont varié en fonction des poutres testées. Ainsi, deux jauges de déformation ont été installées au centre, sur le béton au niveau de la surface supérieure de la poutre, et sur l'acier d'armature longitudinale pour les poutres de référence P0-Sika, P0-Repla et Pref. Les jauges sur l'acier ont, entre autres, permis de vérifier s'il y a plastification de l'acier avec les deux différentes configurations de renforcement externe en matériaux composites. Pour toutes les autres poutres, ce sont uniquement les déformations du composite qui ont été recueillies. La disposition des jauges sur le renforcement de composite est indiquée sur les figures 5.3 et 5.5. Avec cette disposition, il sera possible de vérifier la répartition des contraintes le long de la section de composite.

5.1.5 Essai d'arrachement sur les blocs

L'objectif de cet essai est de vérifier si l'exposition cyclique a affecté la qualité du joint. À la fin de leurs expositions, les lamelles ont été arrachées des blocs par une mise en tension à l'aide d'une presse MTS. La capacité de la cellule de charge utilisée était de 90 kN. La figure 5.9 présente un aperçu du montage expérimental. La réalisation de cet essai est basée sur le contrôle de la force et le taux de chargement a été fixé préalablement à 0,833 kN/min. Pour ce qui est de l'instrumentation, l'allongement (glissement) de la lamelle a été mesuré avec deux LVDT placés de chaque côté du bloc. La longueur de référence de ces LVDT est de 210 mm. De plus, des

jauges électriques ont été installées sur la bande de composite afin de suivre la progression de l'état de contrainte. Toutes les lectures ont été prises automatiquement à l'aide du système d'acquisition de données DORIC 245 à intervalles réguliers (cinq secondes) et compilées dans un fichier informatique. La disposition des jauges sur le renforcement de composite est indiquée sur les figures 5.4, 5.6 et 5.7.

5.2 Cycles de gel-dégel

Le climat canadien est propice aux soubresauts de la température près du point de congélation. Cette condition affecte et détériore plusieurs ouvrages en béton et particulièrement les ponts routiers. Aujourd'hui, la plupart des ouvrages réalisés en béton sont en mesure d'affronter cette condition agressive et sont ainsi plus durables à condition, bien sûr, d'avoir réuni tous les éléments favorables lors de la fabrication. Avec la venue des composites dans les structures, les concepteurs sont donc intéressés à savoir si ces matériaux seront performants lors d'exposition répétitive au gel et au dégel.

Cet autre aspect de la durabilité, traité dans le cadre de ce programme expérimental, a été étudié avec la collaboration de l'Université Queen's de Kingston, Ontario. Cette université est affiliée au Réseau de Centres d'excellence ISIS Canada. La présente étude diffère de celles présentées au chapitre 2, d'une part, par le matériau composite utilisé et d'autre part, par sa durée d'exposition.

5.2.1 Description des échantillons

Neuf poutres en béton armé de 100 mm x 150 mm x 1215 mm ont été utilisées pour les essais. Ces poutres étaient déjà fabriquées à l'Université Queen's depuis plusieurs mois. L'armature longitudinale est constituée de trois barres lisses de 5 mm de diamètre, procurant ainsi une aire totale de 60 mm². Cette quantité d'acier est légèrement supérieure à l'aire minimale requise par la norme canadienne CSA A23.3-94. Pour l'armature transversale, des barres de 5 mm de diamètre ont aussi été utilisées. De plus, les poutres ont deux barres (5 mm) comme armature de compression. La configuration de l'acier d'armature des poutres est représentée à la figure 5.10.

Un total de douze blocs en béton de 150 mm x 150 mm x 400 mm ont été utilisés pour cette série d'essais. Les blocs ont été fabriqués à l'Université de Sherbrooke, puis après l'installation du composite, les blocs ont été transportés à Kingston dans la chambre froide de l'Université Queen's, pour être soumis aux mêmes conditions cycliques de gel-dégel que les poutres. À la fin de l'exposition, les blocs ont été ramenés et testés au laboratoire de structures de l'Université de Sherbrooke.

Une coulée de béton (#3) a servi à la construction des blocs. Un béton ayant une résistance spécifiée à 28 jours de 35 MPa a été obtenu d'un fournisseur local. La grosseur maximale des granulats était de 10 mm. Les caractéristiques du béton frais sont présentées au tableau 5.1. Après leur fabrication, les blocs ont subi une cure humide de 14 jours.

5.2.2 Installation du matériau composite

Carbodur S

La préparation des surfaces de béton et les propriétés de ce matériau sont identiques à celles décrites à la section 5.1.2. Cependant, les lamelles de ces poutres ont été collées sur une longueur de 300 mm à chaque extrémité avec le mortier adhésif Sikadur 30, laissant ainsi une longueur de 425 mm libre au centre de la poutre. Les détails de ce renforcement sont montrés à la figure 5.11. La raison de cette configuration est similaire à celle présentée antérieurement, sauf que dans le cas présent, on a tenu compte de la résistance au cisaillement de la poutre et de la disposition des étriers. Concernant les blocs, la configuration du collage est la même qu'à la section 5.1.2 et est illustrée à la figure 5.6. Enfin, après l'installation des composites, une cure de 12 jours a précédé le début des cycles de gel-dégel.

5.2.3 Exposition

Jusqu'à maintenant, il n'y a aucune norme ou règle générale permettant de vérifier la fiabilité des matériaux composites suite à des cycles de gel-dégel pour les réhabilitations d'éléments en béton armé. Dans le cadre du présent programme expérimental, le cycle choisi fait cependant en sorte que la nature de l'exposition ainsi que sa durée sont similaires à celles rencontrées dans les normes ASTM C666 et C672 réservées à l'évaluation de la durabilité des bétons. Un cycle de

gel-dégel par jour était effectué. Chaque cycle correspondait à 16 heures de gel à l'air libre, à une température de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, suivie d'une période de 8 heures de dégel dans l'eau à une température de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Le tableau 5.5 indique le nombre de spécimens, poutres et blocs, qui ont été soumis à l'exposition cyclique et ceux qui sont demeurés dans les conditions ambiantes du laboratoire servant de référence. Les tests de flexion et d'arrachement ont été effectués après 50, 150 et 300 cycles de gel-dégel.

5.2.4 Essai de flexion sur les poutres

À la fin de l'exposition aux conditions d'endommagement, les poutres ont été chargées de façon quasi statique avec une presse jusqu'à la rupture. Il est à noter que ces essais se sont déroulés au laboratoire de l'Université Queen's à Kingston. La portée des poutres sur appuis simples était de 1067 mm et les deux charges concentrées étaient situées à leurs tiers points. La figure 5.12 présente un aperçu du montage expérimental. Les flèches au centre ont été mesurées à l'aide de deux LVDT placés de chaque côté de la poutre. Deux LVDT ont également été installés au-dessus des supports. Sur certaines poutres, des mesures ont été prises avec des plots *DEMEC*, dans le but de connaître la position de l'axe neutre et d'évaluer la courbure. Le taux de chargement a été contrôlé manuellement et a été sensiblement le même pour chacune des poutres. Des jauges électriques ont permis de mesurer les déformations unitaires sur le composite. La disposition des jauges sur le renforcement de composite est indiquée à la figure 5.11. Avec cette disposition, il sera possible de vérifier la répartition des contraintes le long de la section de composite. Toutes les lectures ont été prises automatiquement à l'aide du système d'acquisition de données *LABTECH* à intervalles réguliers et compilées dans un fichier informatique.

5.2.5 Essai d'arrachement sur les blocs

La procédure telle que décrite à la section 5.1.5 a été employée pour cette série d'essai.

Cette section termine la présentation des éléments reliés aux essais de l'interface composite-béton et les résultats font l'objet d'analyse aux chapitres suivants.

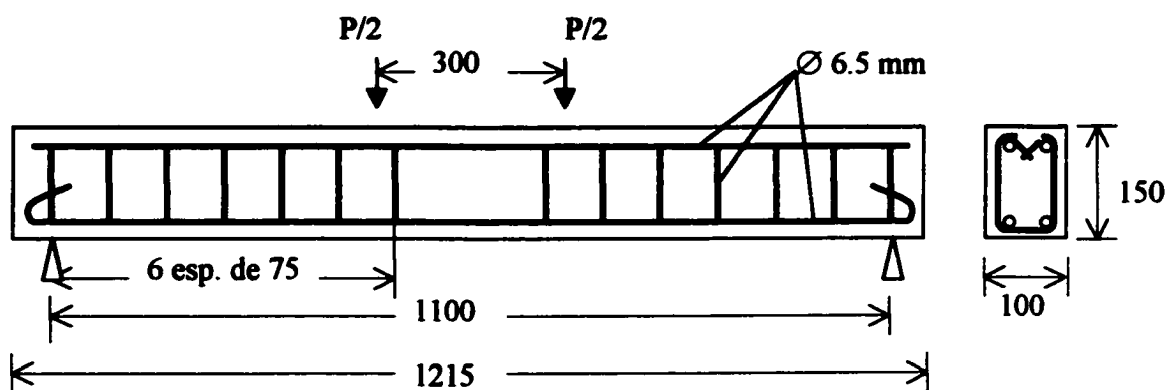


Figure 5.1 - Configuration de l'acier d'armature et détails géométriques

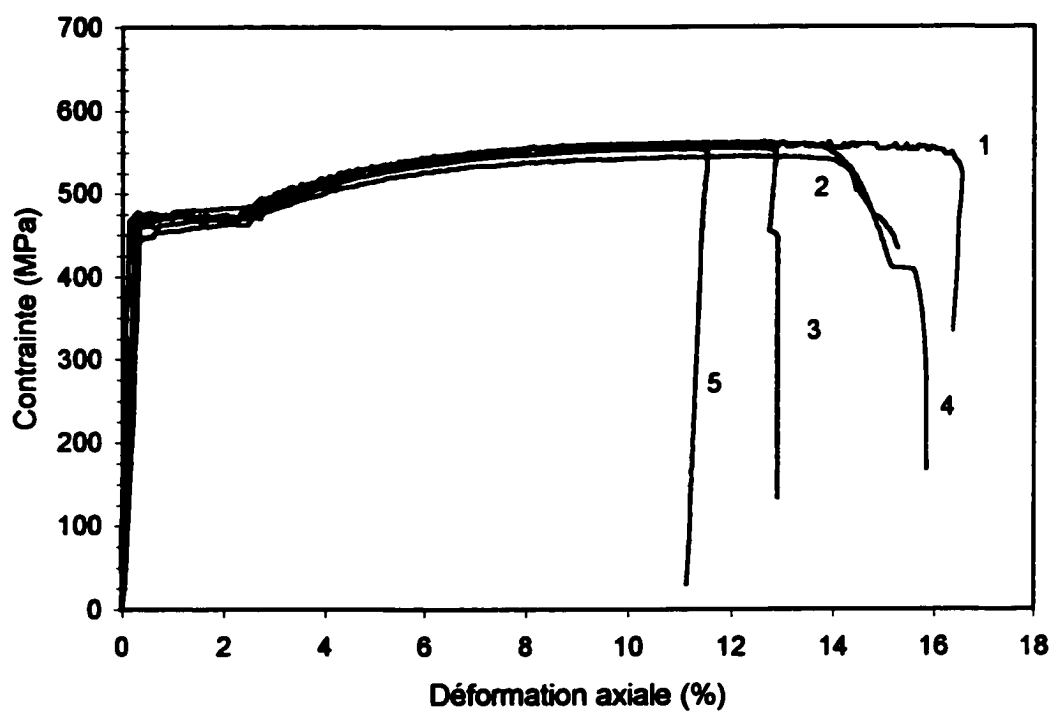


Figure 5.2 - Courbes caractéristiques de l'acier d'armature utilisé

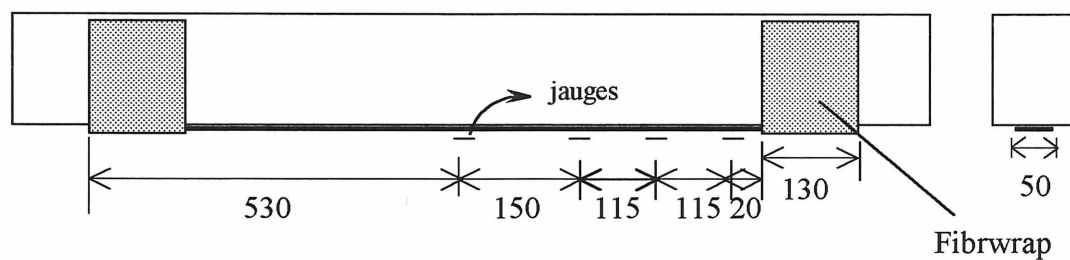


Figure 5.3 - Configuration du renforcement avec le Replark 20 et disposition des jauges

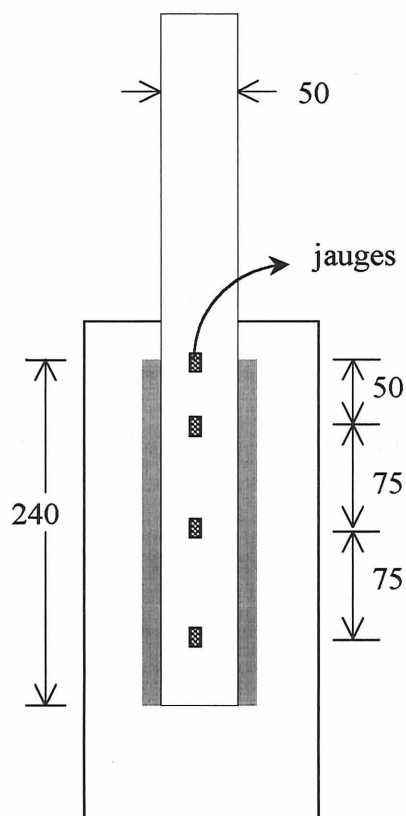


Figure 5.4 - Configuration du Replark 20 sur un bloc et disposition des jauges

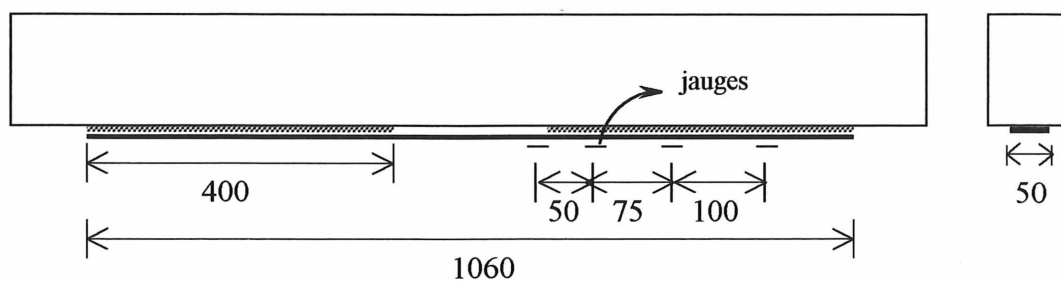


Figure 5.5 - Configuration du renforcement avec la lamelle Carbodur S et disposition des jauges

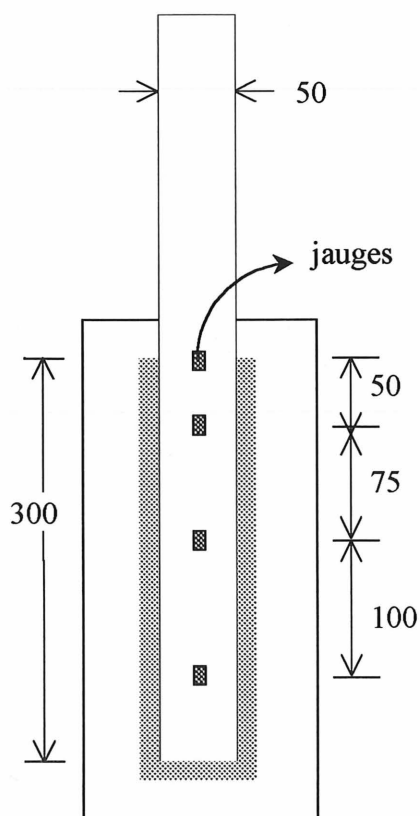


Figure 5.6 - Configuration de la lamelle Carbodur S sur un bloc et disposition des jauges

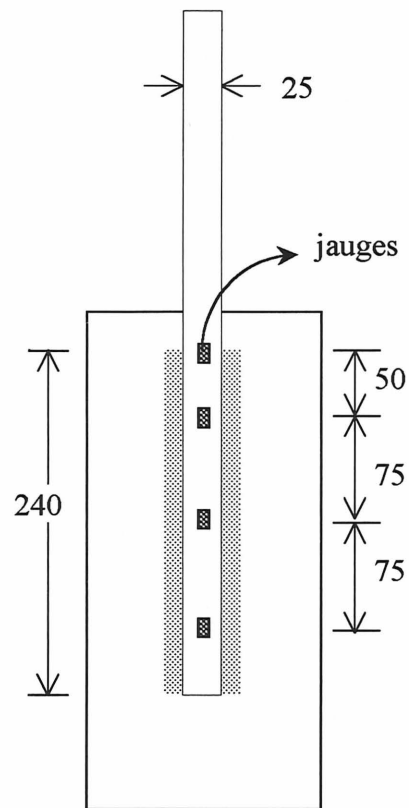


Figure 5.7 - Configuration du Fibrwrap sur un bloc et disposition des jauges

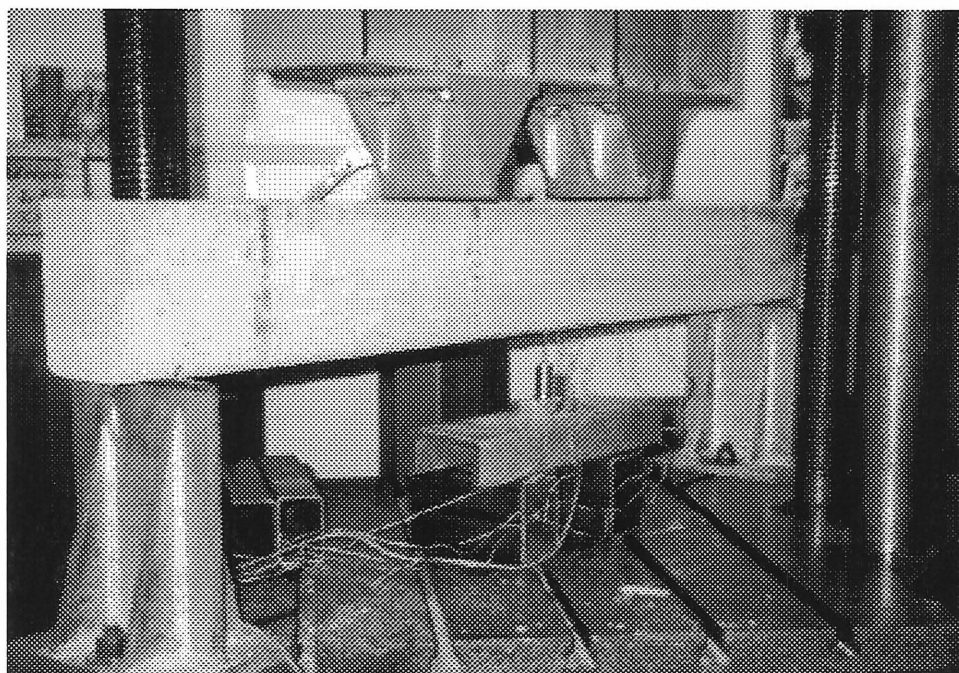


Figure 5.8 - Montage d'essais sur les poutres après le mouillage-séchage

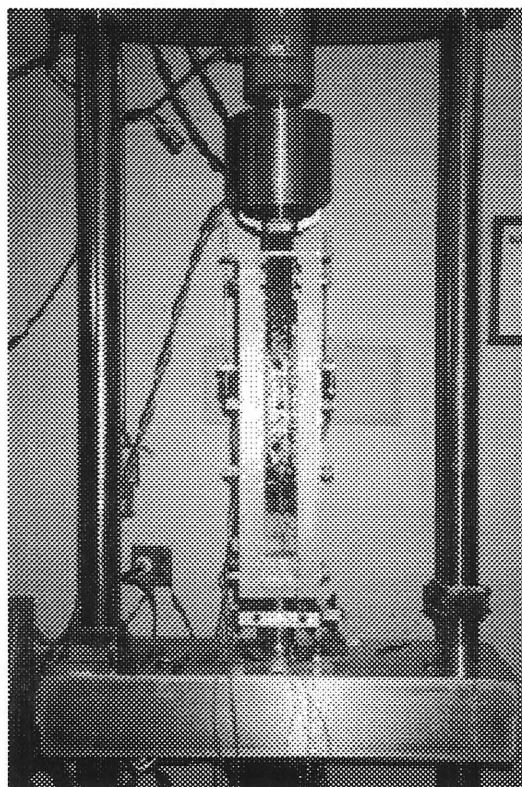


Figure 5.9 - Montage d'essais pour les blocs

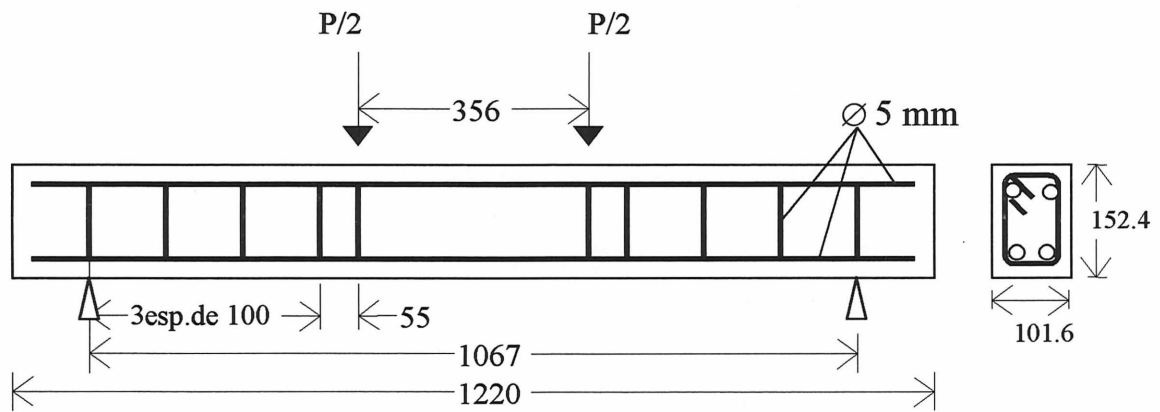


Figure 5.10 - Configuration de l'acier d'armature et détails géométriques

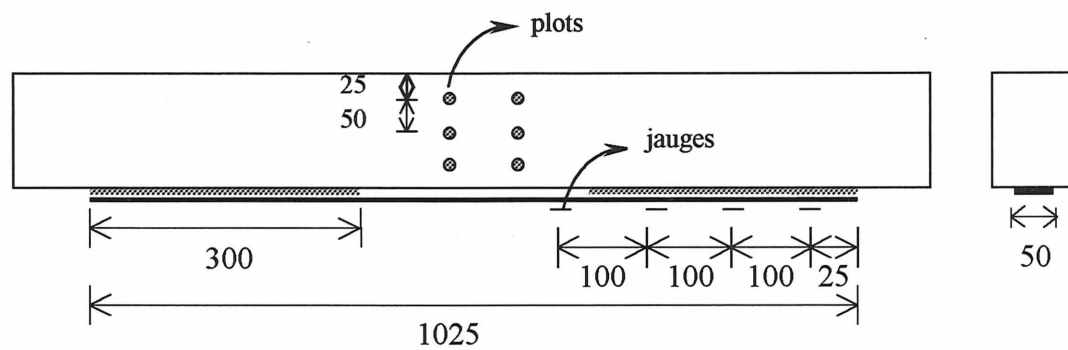


Figure 5.11 - Configuration du renforcement avec la lamelle Carbodur S et disposition des jauges

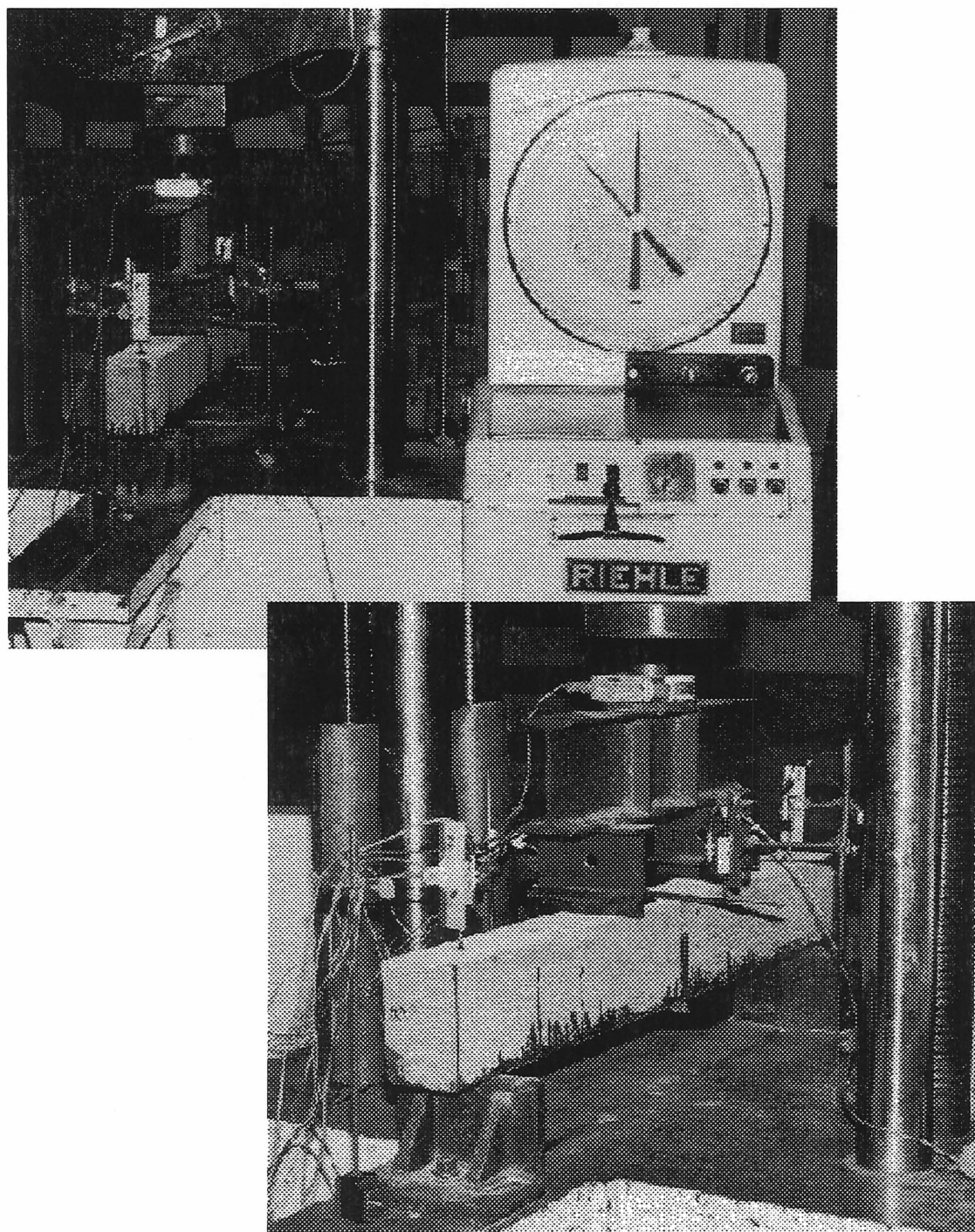


Figure 5.12 - Montage d'essais sur les poutres après le gel-dégel

Tableau 5.1 - Caractéristiques de chaque coulée de béton

Coulée	Affaissement (mm)	Teneur en air (%)	f'_c (MPa)	Date de la coulée
Kingston	nd	6,0	31	août 96
1	150	8,0	29	26 juin 97
2	150	5,5	40	1 août 97
3	110	4,0	38	29 août 97
4	130	4,6	38	10 sept 97
5	120	5,0	38	22 sept 97

Tableau 5.2 - Liste des échantillons pour les essais de mouillage-séchage

Échantillons	Produit de renforcement	Nombre de cycles	Nom du groupe	Quantité	Coulée de béton	Résistance du béton à l'essai	Nombre de jours
Poutres							
	CarboDur S	0	P0-Sika	2	2	47,6	194
	CarboDur S	13	P13-Sika	2	5	47,4 (50,1)	142
	CarboDur S	26	P26-Sika	2	5	45,3 (55,5)	239
	Replark 20	0	P0-Repla	2	2	47,6	194
	Replark 20	13	P13-Repla	2	4	47,5 (50,5)	154
	Replark 20	26	P26-Repla	2	4	46,3 (54,5)	251
	Aucun	0	Pref	2	1	33,9	229
Blocs							
	CarboDur S	0	B0-Sika	3	5	47,4	142
	CarboDur S	13	B13-Sika	3	5	47,4 (50,1)	142
	CarboDur S	26	B26-Sika	3	5	45,3 (55,5)	239
	Replark 20	0	B0-Repla	3	4	47,5	154
	Replark 20	13	B13-Repla	3	4	47,5 (50,5)	154
	Replark 20	26	B26-Repla	3	4	46,3 (54,5)	251
	Fibrwrap	0	B0-Tyfo	3	4	47,5	154
	Fibrwrap	13	B13-Tyfo	3	4	47,5 (50,5)	154
	Fibrwrap	26	B26-Tyfo	3	4	46,3 (54,5)	251

() pour des cylindres de béton (100 mm x 200 mm) ayant subi les cycles de mouillage-séchage

Tableau 5.3 - Caractéristiques du mortier Sikadur 30

Type	Mortier adhésif
Composantes de base	A : résines époxy B : amines
Rapport de mélange (par poids)	A : 3 B : 1
Densité relative (A + B)	1,77 kg/L
Propriétés en traction (ASTM D638) à 7 jours	
Résistance en traction	24,8 MPa
Module élastique	4500,0 MPa
Déformation	1,0 %
Propriétés en flexion (ASTM D790) à 14 jours	
Module de rupture	46,8 MPa
Module d'élasticité	11700,0 MPa
Résistance au cisaillement (ASTM D732) à 14 jours	24,8 MPa
Coefficient de dilatation thermique	$9 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$
Température de transition vitreuse	62°C
Retrait	0,04 %
Épaisseur maximale du plan de colle	3 mm
Vie en pot	40 minutes à 35°C
Conditions d'entreposage	endroit sec entre 5°C à 30°C
Taux d'application par unité de 2.82 litres (5 kg A+B)	
lamelle de 50 mm de largeur	18,8 m
lamelle de 120 mm de largeur	7,8 m

Source : fiche technique, Sika Construction

Tableau 5.4 - Propriétés des lamelles Carbodur

Propriétés	Type S
Teneur volumétrique en fibres	> 68%
Densité apparente (kg/m ³)	1600
Épaisseur (mm)	1,2
Résistance en tension (MPa)	>2400
Module élastique (MPa)	>155 000
Déformation ultime (%)	>1,9
Résistance thermique	> 150°C

Source : fiche technique, Sika Construction

Tableau 5.5 - Liste des échantillons pour les essais de gel-dégel

Échantillons	Produit de renforcement	Nombre de cycles	Nom du groupe	Quantité	Coulée de béton	Résistance du béton à l'essai	Nombre de jours
Poutres							
	CarboDur S	0	P0-Sika	2	Kingston	50,0*	400*
	CarboDur S	50	P50-Sika	2	Kingston	50,0*	400*
	CarboDur S	150	P150-Sika	2	Kingston	50,0*	550*
	CarboDur S	300	P300-Sika	3	Kingston	50,0*	700*
Blocs							
	CarboDur S	0	B0-Sika	3	3	48,3	190
	CarboDur S	50	B50-Sika	3	3	50,0*	190
	CarboDur S	150	B150-Sika	3	3	50,0*	265*
	CarboDur S	300	B300-Sika	3	3	50,0*	415*

* données approximatives

Chapitre 6

EFFETS DES CYCLES DE MOUILLAGE-SÉCHAGE SUR L'INTERFACE COMPOSITE-BÉTON

Ce chapitre présente l'étude relative à la vérification de l'endommagement du matériau composite et de l'affaiblissement de l'interface composite-béton à la suite de l'exposition aux cycles de mouillage-séchage. Les différentes données obtenues à l'aide des instruments de mesure sont interprétées à partir de graphiques et de tableaux. Étant donné la quantité considérable de résultats obtenus lors des essais, seules des courbes typiques sont présentées dans ce chapitre, et l'ensemble des résultats sont reportés à l'annexe C. La prochaine section résume les paramètres généraux discutés à l'intérieur de ce chapitre.

6.1 Paramètres de l'analyse

Rappelons que deux types d'essais ont été réalisés. En premier lieu, des poutres de 1,2 mètres de longueur, renforcées par des lamelles de composites, ont été soumises à des essais de flexion. En second lieu, des essais d'arrachement ont été réalisés sur des lamelles de composite collées à des blocs de béton, afin de mesurer leur adhérence. Ces deux types d'échantillons ont été soumis à la même exposition de mouillage-séchage.

En ce qui concerne les essais de flexion sur les poutres, la discussion portera sur la charge ultime obtenue, la fissuration observée et les modes de rupture qui sont survenus. Les graphiques présentés comprennent des courbes de la charge en fonction de la flèche, la charge en fonction de la déformation dans l'acier, la charge en fonction de la déformation dans le composite et le moment en fonction de la déformation dans le composite.

Pour ce qui est des essais d'arrachement sur les blocs, une discussion sur la charge ultime et sur leur mode de rupture est tout d'abord présentée. De même, l'analyse des différentes données obtenues avec ce type d'expérimentation est effectuée à partir de graphiques.

Pour l'ensemble de ces essais, l'élément majeur de cette étude portant sur la vérification de la qualité de l'interface composite-béton, une analyse du profil des déformations et de l'évolution de la contrainte d'adhérence sera présentée à la fin de chaque section. Cette analyse est basée sur les travaux de recherche de Bizindavyi et Neale (1999). Avec la distribution des jauges électriques illustrée au chapitre 5, le profil des déformations, en fonction du chargement, peut être établi le long de la lamelle. À partir de ce profil de déformations, il est alors possible de calculer une contrainte moyenne entre deux jauges consécutives et obtenir ainsi la contrainte d'adhérence à l'interface. Ces auteurs ont démontré, qu'avant la charge de fissuration, le profil des déformations et la contrainte d'adhérence ont tendance à décroître de manière exponentielle. Connaissant les déformations d_i et d_j au point i et j , l'épaisseur t_p de la lamelle, son module élastique E_p et la distance Δl_{i-j} entre ces deux points de lecture, il est alors possible de déterminer la contrainte d'adhérence avec l'équation suivante :

$$\tau_{i-j} = \frac{t_p E_p (d_i - d_j)}{\Delta l_{i-j}} \quad (6-1)$$

Selon les matériaux composites employés dans cette étude, il a été considéré dans les calculs, pour le Replark 20, une épaisseur t_p de 0,8 mm et un module élastique E_p de 70 000 MPa. Ces valeurs reflètent assez bien la réalité du laboratoire et les valeurs obtenues au chapitre 4 selon la proportion fibre-matrice. Puis en ce qui concerne le Carbodur S, une épaisseur t_p de 1,2 mm et un module élastique E_p de 155 000 MPa ont été utilisés. Ces dernières données sont fournies par le fabricant.

D'une autre manière, pour une longueur de collage donné, il est possible d'estimer la contrainte moyenne à l'interface composite-béton en divisant tout simplement la force appliquée F par sa surface $b_p L$.

$$\tau_m = \frac{F}{b_p \times L} \quad (6-2)$$

6.2 Cycles de mouillage-séchage sur les poutres

6.2.1 Résultats des essais de flexion

Le tableau 6.1 présente le sommaire des résultats des essais de flexion sur les poutres après 0, 13 et 26 cycles de mouillage-séchage. Ce tableau regroupe les données sur la charge de fissuration, la charge ultime, la déformation maximale dans le composite observée à la charge ultime ainsi que la flèche au centre. Tel qu'indiqué au tableau, deux poutres identiques ont été testées à chaque étape. On retrouve aussi les résultats de deux poutres en béton armé conventionnelles servant à comparer le degré du renforcement externe des autres poutres.

6.2.2 Charge ultime

a) Replark 20

La figure 6.1 illustre la charge ultime atteinte pour chacune des poutres en fonction du nombre de cycles subi. Les poutres de contrôle P0 ont atteint une charge moyenne de 51.5 kN. Pour celles ayant subi 13 et 26 cycles, les charges moyennes sont respectivement de 46.6 kN et de 45.7 kN. Alors après 13 cycles une diminution de 9.5 % est remarquée et, après 26 cycles, cette diminution passe à 11.3 %. Quoique les résultats aient été obtenus avec seulement deux poutres dans chaque cas, la consistance des résultats entre deux cas similaires nous permet d'attribuer cette diminution à l'effet des cycles de mouillage-séchage. En effet, même si les poutres de contrôle ont été fabriquées avec une coulée différente des autres poutres, les résistances du béton à 28 jours et lors de l'expérimentation sont presque identiques pour l'ensemble des poutres. De plus, le fait que les poutres aient subi les cycles, cet environnement humide n'a pas détérioré les propriétés du béton, mais a plutôt eu un effet bénéfique même si cela n'est pas démontré expérimentalement.

b) Carbodur S

Les charges ultimes observées en fonction du nombre de cycles subi avec ces poutres renforcées sont illustrées à la figure 6.2. Une augmentation en moyenne de 9.8 % a été constatée après 13 cycles alors qu'après 26 cycles une légère augmentation de 1.3 % a été observée.

6.2.3 Observations sur la fissuration et le mode de rupture

a) Replark 20

La rupture de l'ensemble des poutres s'est produite par la rupture en traction de la lamelle composite. Cette rupture survenait dans la région du moment maximum c'est-à-dire entre les deux charges concentrées, là où une fissure de flexion s'était développée préalablement. On note une exception pour la poutre P13-Repla-B, pour laquelle cette rupture s'est produite juste à côté de l'ancrage en fibres de verre. La figure 6.3 montre un exemple de cette rupture. Il est à noter qu'une petite couche de béton se retrouvait sur la lamelle et confirme donc qu'il y avait une bonne adhérence entre le béton et le matériau composite. La figure 6.4 présente le réseau de fissuration d'une poutre typique au moment où elle atteignait la charge ultime. Le réseau de fissuration de chaque poutre est illustré en annexe à la figure C.1. Il a été observé, jusqu'à environ la moitié du chargement, qu'un réseau principal de trois à quatre fissures apparaissait dans la section centrale de la poutre. Par la suite, quelques fissures de cisaillement se manifestaient entre les appuis et les points d'application des charges concentrées. Au fur et à mesure que le chargement progressait vers la rupture, ce réseau de fissures s'amplifiait et des petites fissures secondaires apparaissaient et rejoignaient les fissures principales. Lors de l'apparition de ces fissures secondaires entre les appuis et les points d'application des charges concentrées, ces dernières avaient comme effet d'amorcer le décollement de la lamelle jusqu'à l'ancrage. Grâce à la présence de l'ancrage, le chargement s'est poursuivi et la rupture en traction du composite survenait par la suite. Ainsi, si l'ancrage avait été absent, le délaminage complet de la plaque composite aurait été imminent.

b) Carbodur S

Le mode de rupture avec ce type de matériau est bien différent de celui décrit précédemment. Pour cette configuration, toutes les poutres se sont brisées à cause du cisaillement près de

l'interface composite-béton. À la rupture, une extrémité de la bande de Carbodur s'est arrachée et a entraîné toute la couche de béton située jusqu'à la surface des armatures. Suivant ce mode de rupture, l'augmentation de la charge ultime observée à la section précédente peut donc résulter de l'amélioration des propriétés du béton. La figure 6.5 illustre ce mode de rupture. Ce mode de rupture avait été anticipé, et même favorisé étant donné la particularité du collage effectué lors de l'installation de la lamelle sous la poutre. La figure 6.6 présente la fissuration typique d'une poutre à la charge ultime. La fissuration sur chacune des poutres est présentée à la figure C.2.

6.2.4 Charge-flèche

a) Replark 20

La figure 6.7 illustre les courbes charge-flèche obtenues expérimentalement pour l'ensemble de ces poutres. Il convient de rappeler que pour chaque exposition, deux poutres ont été testées et leurs réponses sont similaires. Leur comportement en flexion demeure essentiellement identique, malgré les cycles subis et se caractérise par trois phases de rigidité : avant la fissuration, jusqu'à la plastification de l'acier d'armature, et la phase ultime qui se poursuit jusqu'à la rupture en traction de la plaque composite. La diminution de la charge ultime mentionnée à la section 6.2.2 est aussi observable sur cette dernière figure. Il est à remarquer que pour la poutre P26-Repla-B, seulement la charge et la flèche obtenue à la rupture diffèrent des autres poutres.

b) Carbodur S

La figure 6.8 présente les courbes charge-flèche obtenues lors de l'essai de flexion. Il faut mentionner que deux poutres ont été testées et leurs réponses en flexion sont presque identiques et ce, pour les diverses durées d'exposition. Les trois phases qui caractérisent le comportement des poutres renforcées avec un matériau composite sont nettement moins distinctes pour ce produit que pour le produit Replark 20. Ceci est une conséquence d'un faible pourcentage d'acier à l'intérieur de la poutre, de la très grande rigidité ainsi que de la section de ce matériau composite. De plus, on note que la plastification de l'acier d'armature survient très tard (environ à 75 % de la charge ultime) au cours du chargement. En dépit du nombre de cycles de mouillage-séchage imposé aux poutres, leur comportement demeure le même.

6.2.5 Charge-déformation dans l'acier d'armature

Replark 20 et Carbodur S

Des jauges électriques ont été installées sur l'acier d'armature des poutres de contrôle P0 seulement. Les jauges étaient placées à mi-portée et les informations recueillies sont montrées aux figures 6.9 et 6.10. L'obtention de cette information avait pour but de vérifier la plastification de l'acier d'armature pour des poutres ayant un renforcement externe. Selon la résistance de l'acier employé et en prenant un module élastique de 200 GPa, la plastification devait avoir lieu entre 2200 $\mu\epsilon$ et 2400 $\mu\epsilon$. Cette constatation s'est avérée correcte pour les poutres renforcées de Replark alors que pour le Carbodur la plastification semble être survenue autour de 2550 $\mu\epsilon$. Une des raisons pouvant expliquer cette différence peut être attribuable à l'absence de continuité entre la plaque et la section de béton armé au centre de la poutre.

6.2.6 Charge-déformation dans le composite

a) Replark 20

La figure 6.11 illustre la charge appliquée et les déformations du composite selon la position de la jauge sur le renforcement externe pour les poutres de contrôle P0. La disposition des jauges a été montrée à la figure 5.3 et mentionnons que la position des jauges a été identifiée en fonction de leur distance de l'appui gauche de la poutre. Ainsi la jauge située à 530 mm est à mi-portée, celle à 680 mm est située sous le point de chargement, celle à 910 mm est située à 20 mm de l'ancrage et, celle à 795 mm est situé à mi-chemin entre la jauge 680 mm et 910 mm. Il a été observé sur ces graphiques qu'avant l'apparition des premières fissures, la contribution du composite à la résistance et à la rigidité de la poutre était très faible. Après la fissuration, la jauge située sous le point de chargement indique une contribution du composite. Par la suite, avec la progression du chargement et l'apparition de nouvelles fissures, la sollicitation du matériau composite est de plus en plus grande. Une autre observation porte sur les lectures des déformations des jauges à 530 mm et 680 mm. L'effort de traction devant être constant dans cette région, les déformations devraient être similaires. Or, avec la présence de fissures, les déformations tendent à se confondre seulement après avoir atteint 50 % du chargement et ce, jusqu'à l'atteinte de la charge ultime de la poutre. Pour tous les cas, rappelons que la charge ultime de la poutre a été contrôlée par la rupture en traction du composite.

Il en ressort les mêmes conclusions pour les poutres ayant subi les 13 et 26 cycles de mouillage-séchage. Les courbes similaires correspondant à ces poutres sont présentées aux figures C.3 et C.4 de l'annexe C.

Il est important de souligner que les déformations observées à l'ultime sont légèrement inférieures à la déformation prescrite par le fabricant. L'écart entre les déformations observées expérimentalement et la déformation que fournit le fabricant peut-être attribuable aux concentrations de contraintes situées au droit d'une fissure sur la poutre. Les déformations maximales obtenues pour les poutres P0 sont de 1.16 % et de 1.13 % alors que pour les poutres P13 et P26 ayant subi les cycles de mouillage-séchage, le composite a atteint des déformations allant de 0.81 % à 1.04 %. Cette diminution est conséquente avec la diminution observée au niveau de la charge ultime.

b) Carbodur S

Les courbes charge-déformation du composite, pour les poutres de contrôle, sont montrées à la figure 6.12. Celles concernant les poutres ayant subi l'exposition cyclique sont présentées respectivement aux figures C.5 et C.6. Mentionnons que la jauge à 660 mm est située aux début du joint et par la suite un espacement de 50 mm, 75 mm et 100 mm séparent successivement les autres jauges sur le joint. Cette disposition des jauges est montrée à la figure 5.5. L'état de déformation est presque identique pour l'ensemble de poutres, quelle que soit leur exposition. La jauge située sur le joint est celle qui atteint le maximum de la déformation. Pour les poutres P0, les déformations maximales obtenues avant la rupture sont de 0.44 % et 0.45 %. Pour les poutres ayant subi les cycles de mouillage-séchage, les déformations maximales atteignent plus de 0.5 %.

6.2.7 Moment-déformation dans le composite

a) Replark 20

La figure 6.13 illustre le moment appliqué et les déformations du matériau composite obtenues selon la position des jauges le long de la portée. D'après la statique, pour un même moment, les déformations dans le matériau composite devraient être identiques le long de la poutre. En

théorie, les courbes devraient donc se superposer. Selon les courbes expérimentales, seulement la portion avant le moment de fissuration respecte cette théorie. Cependant, après un certain moment, on remarque que la jauge située à 530 mm et celle à 680 mm nous donnent sensiblement les mêmes résultats. Notons que ces jauges sont situées dans la région du moment constant.

En ce qui concerne les poutres ayant subi les cycles de mouillage-séchage, des courbes similaires sont présentées aux figures C.7 et C.8 et ne présentent aucune différence majeure malgré leur exposition.

b) Carbodur S

On présente le même genre de courbes aux figures 6.14, C.9 et C.10. Une analyse de la statique s'applique aussi pour ces poutres et on observe que certaines courbes se superposent pendant un certain moment au cours du chargement. Avec ce type de matériau composite, on constate que les courbes sont un peu plus regroupées et que l'écart entre les courbes demeure presque constant durant le chargement.

6.2.8 Profil des déformations

a) Replark 20

Les figures 6.15, C.11 et C.12 présentent les lectures obtenues des jauges de déformation au fur et à mesure que le chargement augmente. Avec ces courbes, il est possible de suivre la progression de la fissuration puisqu'à l'apparition d'une fissure, on observe une augmentation soudaine de la déformation. De même, à partir de ces courbes on peut constater que l'effet de l'ancrage de la lamelle prend de l'importance autour de 40 kN. De fait, la jauge située près de l'ancrage n'est sollicitée qu'à partir de cette charge. Aucune différence significative n'est observée pour les poutres ayant subi les cycles de mouillage-séchage.

b) Carbodur S

La distribution des déformations à différents niveaux de chargement pour l'ensemble de ces poutres est présentée aux figures 6.16, C.13 et C.14. Il est remarqué que ce matériau n'est pas aussi sensible à la fissuration que le produit Replark à cause de sa rigidité d'une part, mais aussi

par le fait de la configuration du collage sur la poutre. La tendance générale de ces poutres confirme que la déformation subit une diminution exponentielle tel que prévu théoriquement. Malgré l'exposition cyclique, il n'y a pas de variations majeures entre les différentes poutres testées.

6.2.9 Évolution de la contrainte d'adhérence

a) Replark 20

À partir des déformations mesurées sur le composite, la contrainte d'adhérence a été calculée avec l'aide de l'équation 6-1. Connaissant cette contrainte en différents points sur la lamelle, il est alors possible d'établir la distribution de la contrainte d'adhérence le long de la poutre. La figure 6.17 montre l'évolution et la distribution de la contrainte d'adhérence le long du renforcement en fonction du niveau relatif du chargement P/P_{\max} , où P représente la charge appliquée à ce niveau de chargement et P_{\max} réfère à la charge de rupture de la poutre. Cette contrainte d'adhérence a été établie à partir des mêmes niveaux de chargement indiqués à la figure 6.15 en plus de quelques niveaux supplémentaires. Il est important de souligner qu'avec un plus grand nombre de jauges et un espacement plus petit, la distribution de cette contrainte serait précise. Cependant, compte tenu de nos objectifs, cette précision additionnelle n'était pas justifiée.

Il est démontré pour les courbes des régions centrales et adjacentes au point de chargement (i.e. 530-680 mm et 680-795 mm) que l'évolution de la contrainte d'adhérence est similaire. De plus, ces courbes montrent qu'à un niveau de chargement donné, la contrainte d'adhérence atteint un maximum et par la suite cette contrainte diminue rapidement, alors qu'au même moment dans la région d'extrémité (i.e. 795-910 mm), elle commence à augmenter. Cette diminution est une indication de la fissuration au niveau de l'interface, alors que l'augmentation observée dans la région adjacente est une conséquence du transfert de la charge dans cette région. La première zone de transition survient autour de 40 % de la charge ultime et la contrainte d'adhérence atteint entre 1.25 MPa et 1.5 MPa. La deuxième zone de transition est observée vers 75 % de la charge maximale et les valeurs de contrainte d'adhérence obtenues sont respectivement de 2.25 MPa et 3.0 MPa pour les poutres A et B. Il est à noter qu'après cette dernière transition, la charge est

presque totalement prise au niveau de l'ancrage. Les figures C.15 et C.16 présentent les courbes obtenues après 13 et 26 cycles de mouillage-séchage. Une diminution substantielle de la contrainte d'adhérence est remarquée pour la région 530-680 mm. Par contre, pour les deux autres régions, les valeurs de contrainte observées sont du même ordre de grandeur que celles des poutres de contrôle. D'une manière générale, la qualité de l'interface n'est pas affectée malgré cette exposition cyclique.

b) Carbodur S

Les figures 6.18, C.17 et C.18 montrent l'évolution et la distribution de la contrainte d'adhérence le long du joint en fonction du niveau relatif du chargement P/P_{\max} . Le comportement de ce joint est bien différent de celui du Replark. La fissuration de l'interface n'est pas du tout significative étant donné la grande résistance de la colle reliant la lamelle composite à la surface de béton et de même que l'adhérence de la lamelle à cette colle. Pour ce type de produit, la contrainte d'adhérence atteint un maximum vers 30 % de la charge de rupture, soit une valeur entre 2.5 MPa et 3.0 MPa. Il est à noter que cette valeur est légèrement supérieure à celle de la résistance théorique du béton en tension de 2.3 MPa. En dépit des cycles de mouillage-séchage, la qualité de l'interface est inchangée.

6.3 Cycles de mouillage-séchage sur les blocs

6.3.1 Résultats des essais d'arrachement

Le tableau 6.2 présente le sommaire des résultats des essais d'arrachement sur les blocs après 0, 13 et 26 cycles de mouillage-séchage. Ce tableau regroupe les données sur la charge ultime, la déformation maximale correspondante dans le composite ainsi que la position de la jauge où cette valeur a été observée.

6.3.2 Charge ultime et observations sur le mode de rupture

a) *Replark 20*

La figure 6.19 illustre la charge ultime atteinte pour chacun des blocs en fonction du nombre de cycles subi. Les blocs de contrôle B0 ont atteint une charge moyenne de 15.4 kN tandis que ceux ayant subi 13 et 26 cycles, les charges moyennes sont respectivement de 17.1 kN et de 17.8 kN. Contrairement aux poutres, une augmentation de 11 % et de 15.7 % de la charge est observée après l'imposition des cycles. Une explication possible de cet accroissement peut être relié à l'amélioration des propriétés du béton. L'observation des lamelles après la rupture confirme qu'il y a une bonne adhérence entre le matériau composite et le béton, puisqu'une mince couche de béton se retrouve sur la lamelle arrachée. Les photos de la figure C.19 représentent ce fait.

b) *Carbodur S*

La figure 6.20 exprime la valeur de la charge ultime obtenue en relation avec le nombre de cycles subi. La charge moyenne observée pour les blocs de contrôle est de 30.1 kN. Alors que la charge moyenne des blocs après 13 cycles est de 45.9 kN et après 26 cycles, elle est de 52.6 kN. Il en résulte donc une augmentation respective de 53 % et de 73 % en rapport avec la valeur de contrôle. Cette importante augmentation peut provenir de deux facteurs ou bien de la combinaison des deux. Le premier facteur est sans doute associé aux meilleures propriétés du béton après l'imposition des cycles. Il est important de souligner que la différence entre les valeurs de résistance en compression obtenue sur les cylindres ne permet pas d'en conclure ainsi. L'autre facteur pouvant justifier cette augmentation est peut être relié à un phénomène de mûrissement du mortier adhésif. Une différence est constatée après une observation visuelle des lamelles arrachées entre les blocs de référence et ceux exposés. À la suite des essais effectués après 13 et 26 cycles, il a été observé qu'une portion du mortier adhésif demeure collée à la surface du bloc de béton. La figure C.20 nous présente cette observation.

c) *Fibrwrap*

Les valeurs de la charge ultime obtenues en fonction du nombre de cycles sont illustrées à la figure 6.21. La charge moyenne obtenue à partir des échantillons de contrôle est de 7.7 kN. Celle après 13 cycles est de 8.7 kN et celle après 26 cycles est de 9.6 kN. Encore une fois, cette

augmentation nous confirme que les cycles de mouillage-séchage n'affectent pas la capacité du joint.

Avec ce produit et la longueur du joint, une valeur de la charge ultime au moins deux fois plus élevée était espérée avec ce type de configuration. Ce phénomène est la conséquence d'un plan de colle beaucoup trop mince effectué lors de la fabrication des échantillons. La figure C.21 présente l'allure des lamelles après l'essai d'arrachement.

6.3.3 Charge-déformation dans le composite

a) *Replark 20*

La figure 6.22 illustre la charge appliquée et les déformations du composite selon la position de la jauge sur le joint pour les blocs de référence B0. Rappelons que la disposition des jauges est montrée à la figure 5.4 et la jauge située à 0 mm est située au début du joint. Les courbes correspondantes aux essais effectués après 13 et 26 cycles de mouillage-séchage sont présentées aux figures C.22 et C.23. Pour les blocs de référence et après 13 cycles, il est observé que la jauge à 0 mm nous donne des valeurs plus ou moins stables. Ceci est attribuable à la non planéité de la surface observée au dessus du joint, résultant sans doute de la procédure de fabrication. En dépit des cycles subis, la réponse des blocs demeure presque identique.

b) *Carbodur S*

Les figures 6.23, C.24 et C.25 illustrent les courbes de la charge et de la déformation obtenues durant les essais. À l'exception de valeurs plus élevées de la charge et des variations au niveau de la déformation, il n'y a pas de différences significatives de comportement malgré l'exposition cyclique au mouillage.

c) *Fibrwrap*

Les courbes charge-déformation du composite, pour les blocs de référence, sont montrées à la figure 6.24. Celles concernant les blocs ayant subi l'exposition cyclique sont présentées respectivement aux figures C.26 et C.27. Il est constaté qu'il n'y a pas de différences majeures à la suite de cette exposition cyclique.

6.3.4 Profil des déformations

a) *Replark 20*

La distribution des déformations à différents niveaux de chargement pour l'ensemble de ces blocs est présentée aux figures 6.25, C.28 et C.29. Avec ces courbes, il est possible de suivre la progression de la fissuration au niveau du joint puisqu'un saut brusque de la valeur de la déformation est notée entre deux niveaux de chargement. Avant la fissuration, la déformation subit une diminution exponentielle tel que prévu théoriquement. Mentionnons pour les blocs B13-Repla-2 et B13-Repla-3 seulement, que les jauges situées au début du joint n'ont pas bien fonctionné et que les valeurs obtenues des autres jauges étaient instables à certains moments au cours du chargement.

b) *Carbodur S*

Les figures 6.26, C.30 et C.31 présentent les lectures obtenues des jauges de déformation au fur et à mesure que le chargement augmente. Encore une fois avant la fissuration, la distribution exponentielle des déformations est bien définie à partir de ces courbes.

c) *Fibrwrap*

Avec l'instabilité des jauges de déformation observée lors de l'expérimentation, à cause de l'irrégularité de la surface, il s'est avéré impossible de poursuivre l'analyse du profil des déformations avec ce matériau.

6.3.5 Évolution de la contrainte d'adhérence

a) *Replark 20*

Comme à la section 6.2.9, à partir des déformations mesurées sur le composite, la contrainte d'adhérence a été calculée avec l'aide de l'équation 6-1. Connaissant cette contrainte en différents points sur la lamelle, il a été possible d'établir la distribution de la contrainte d'adhérence le long du joint. La figure 6.27 montre l'évolution et la distribution de la contrainte d'adhérence le long du renforcement en fonction du niveau relatif du chargement F/F_{\max} , où F représente la charge appliquée à ce niveau de chargement et F_{\max} réfère à la charge de rupture de

la lamelle. Cette contrainte d'adhérence a été établie à partir des mêmes niveaux de chargement indiqués à la figure 6.25 en plus de quelques niveaux supplémentaires.

Ces courbes montrent qu'à un niveau de chargement donné, la contrainte d'adhérence atteint un maximum et par la suite cette contrainte diminue rapidement, alors qu'au même moment dans la zone adjacente, elle commence à augmenter. Cette diminution est une indication de la fissuration au niveau de l'interface, alors que l'augmentation observée dans la région adjacente est une conséquence du transfert de la charge dans cette région. Pour les blocs de référence, la contrainte d'adhérence atteint un maximum entre 4.5 MPa et 5.0 MPa dans la région 0-50 mm et ce à un niveau de chargement d'environ 40 % de la charge ultime. En ce qui concerne les blocs après 13 et 26 cycles (figures C.32 et C.33), il est observé que la contrainte d'adhérence maximale n'est plus située dans la région 0-50 mm. De plus, les valeurs de contrainte obtenues sont légèrement inférieures à celles de référence. Si cette diminution est une conséquence des cycles de mouillage-séchage, elle n'a cependant pas eu d'influence sur la valeur de la charge ultime puisque nous avons noté plutôt une augmentation.

b) Carbodur S

Des courbes similaires ont été tracées avec les profils de déformation observés à la section précédente. Les figures 6.28, C.34 et C.35 montrent l'évolution et la distribution de la contrainte d'adhérence le long du joint en fonction du niveau relatif du chargement F/F_{\max} . Il est remarqué pour les blocs de référence que la contrainte d'adhérence atteint une valeur d'environ 5 MPa et ce, dans la région située au début du joint (i.e. 0-50 mm). De plus, la contribution des deux autres régions est très limitée puisque la rupture survient rapidement après l'atteinte de la contrainte maximale. Or, avec l'augmentation des cycles de mouillage-séchage, il est observé que la contribution des régions 50-125 mm et 125-225 mm est plus importante. De plus, la contrainte d'adhérence est de 6.5 à 7.5 MPa pour les blocs ayant subi les cycles. Cette augmentation de la valeur de la contrainte est conséquente avec l'augmentation générale de la charge ultime.

6.4 Conclusions sur les effets des cycles de mouillage-séchage

La qualité de l'interface a été étudiée suite à des cycles de mouillage-séchage pour deux matériaux composites à base de fibres de carbone. Pour le Replark 20, la conclusion des essais de flexion et d'arrachement sont contradictoires. En effet, si l'essai de flexion a indiqué une diminution d'environ 10 % de la capacité des poutres, une augmentation de plus de 10 % a été obtenue à la suite de l'essai d'arrachement sur les blocs. Toutefois, avec l'ensemble des paramètres regardés dans l'analyse, l'interface composite-béton semble conserver son intégrité.

En ce qui concerne le Carbodur S, une même conclusion se dégage des deux types d'essais. En effet, une légère augmentation de la capacité des poutres a été constatée à la suite de l'essai de flexion, et une augmentation a aussi été observée avec l'essai d'arrachement. La conservation de l'intégrité de l'interface est constatée en dépit des cycles de mouillage-séchage.

Il est observé que les valeurs de la contrainte d'adhérence au niveau des poutres et des blocs sont relativement différentes. Des valeurs environ deux fois plus élevées ont été obtenues avec l'essai d'arrachement et ce, pour les deux matériaux étudiés. Cette différence est essentiellement provoquée par les effets liés à chaque essai. Avec l'essai de flexion, le matériau composite est collé à une surface où le béton est sollicité en tension. Or, avec l'essai d'arrachement, le bloc est appuyé à une rotule et lors du chargement, le béton se retrouve comprimé. Quel que soit l'une des deux méthodes d'essais utilisées, les résultats pour une même série d'essai sont très stables.

Tableau 6.1 - Sommaire des résultats des essais de flexion pour les cycles de mouillage-séchage

Description	Nombre de cycles	Charge de fissuration (kN)	Charge ultime (kN)	Déformation max. dans le PRF ($\mu\epsilon$)	Flèche au centre à la charge ultime (mm)
Reference					
Ref-A	0	7,3	22,7	—	26,4
Ref-B		7,6	23,0	—	23,6
Replark 20					
P0-Repla-A	0	8,3	52,6	11 622	15,3
P0-Repla-B		9,3	50,3	11 358	16,8
P13-Repla-A	13	11,9	46,1	9 646	13,5
P13-Repla-B		11,6	47,0	8 526	12,8
P26-Repla-A	26	11,8	49,5	10 444	14,0*
P26-Repla-B		11,4	41,8	8 148	9,0
Carbodur S					
P0-Sika-A	0	8,0	63,5	4 446	6,5
P0-Sika-B		5,6	62,9	4 474	6,3
P13-Sika-A	13	5,3	70,6	5 076	7,3
P13-Sika-B		4,2	68,2	5 022	7,4
P26-Sika-A	26	8,8	61,9	5 056	7,5
P26-Sika-B		9,1	66,0	5 764	8,0

Tableau 6.2 - Sommaire des résultats des essais d'arrachement pour les cycles de mouillage-séchage

Description	Nombre de cycles	Charge ultime (kN)	Déformation max. dans le PRF	
(µε) à (jauge, mm)				
Replark 20				
B0-Repla-1	0	14,66	5152	0
B0-Repla-2		15,80	6312	50
B0-Repla-3		15,76	5596	50
B13-Repla-1	13	16,47	7686	0
B13-Repla-2		18,34	3230	50
B13-Repla-3		16,54	4788	50
B26-Repla-1	26	19,01	6556	0
B26-Repla-2		17,40	5322	0
B26-Repla-3		17,05	5338	125
Carbodur S				
B0-Sika-1	0	32,70	2076	50
B0-Sika-2		31,20	3100	0
B0-Sika-3		26,30	2652	50
B13-Sika-1	13	45,30	4622	50
B13-Sika-2		44,40	4572	125
B13-Sika-3		44,50	4548	50
B26-Sika-1	26	54,60	5248	0
B26-Sika-2		51,80	5124	50
B26-Sika-3		51,40	4624	0
Fibrwrap				
B0-Tyfo-1	0	7,24	5698	125
B0-Tyfo-2		8,58	5432	50
B0-Tyfo-3		7,23	5234	50
B13-Tyfo-1	13	8,85	6744	50
B13-Tyfo-2		7,29	5392	50
B13-Tyfo-3		9,86	7032	50
B26-Tyfo-1	26	9,51	6840	50
B26-Tyfo-2		10,63	6430	50
B26-Tyfo-3		8,55	5280	50

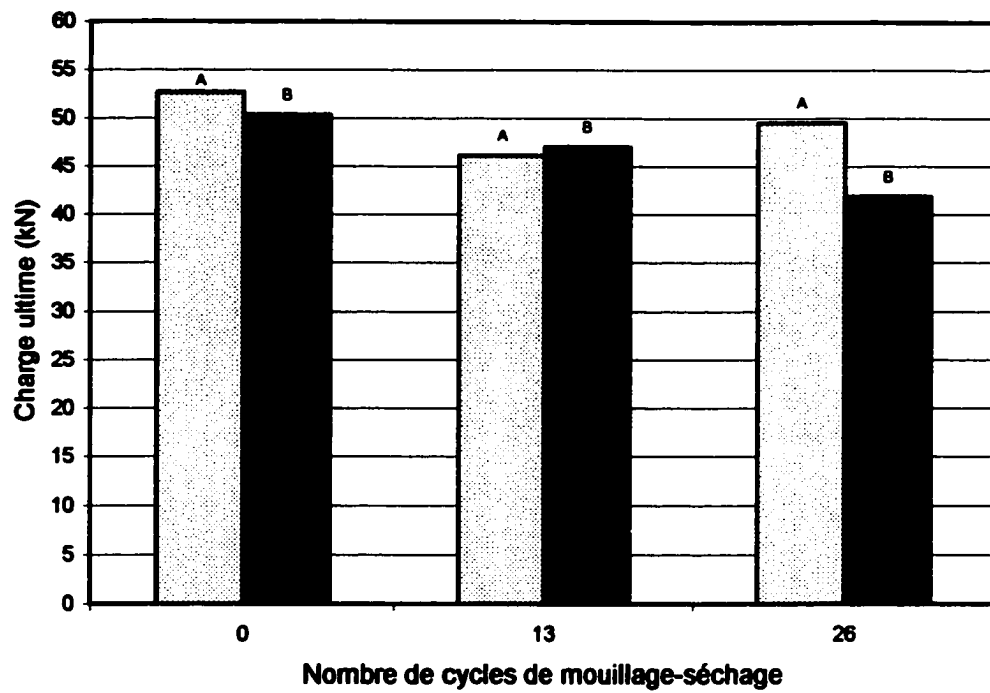


Figure 6.1 - Charge ultime des poutres avec le Replark 20

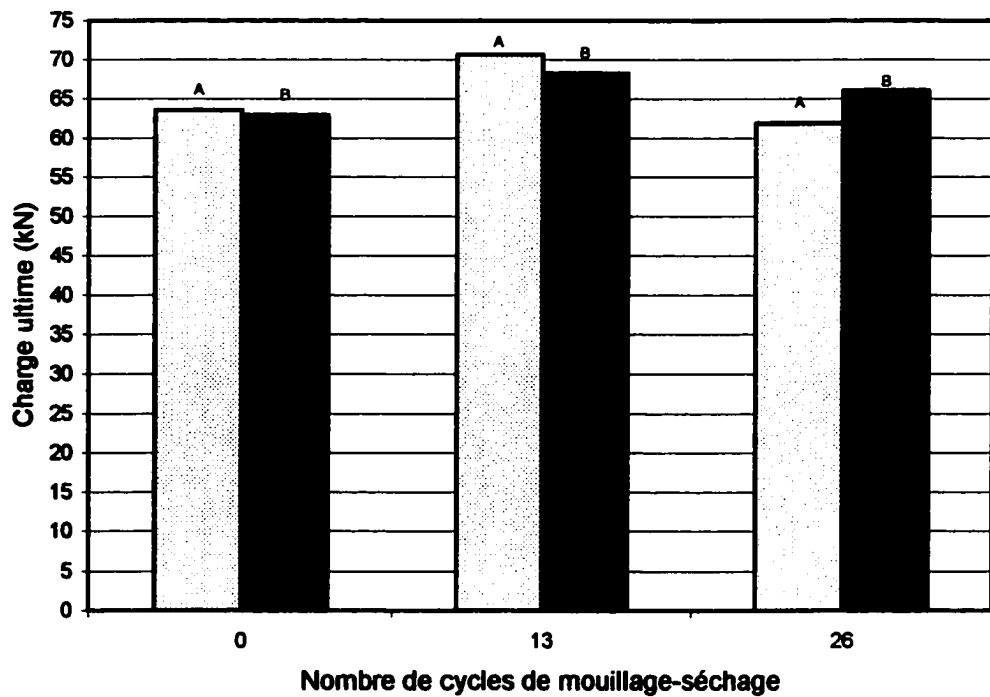


Figure 6.2 - Charge ultime des poutres avec le Carbodur S

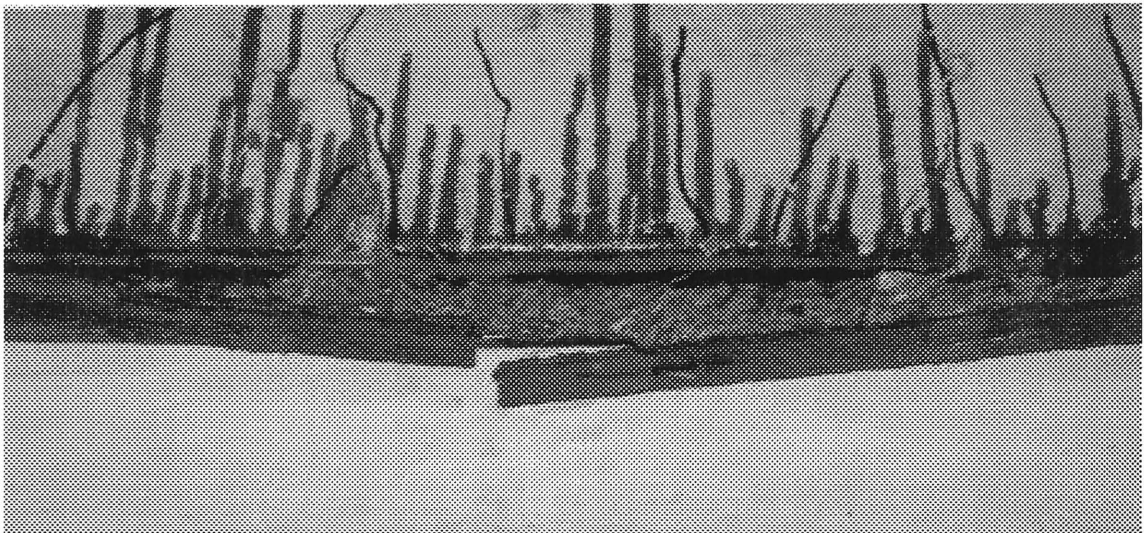
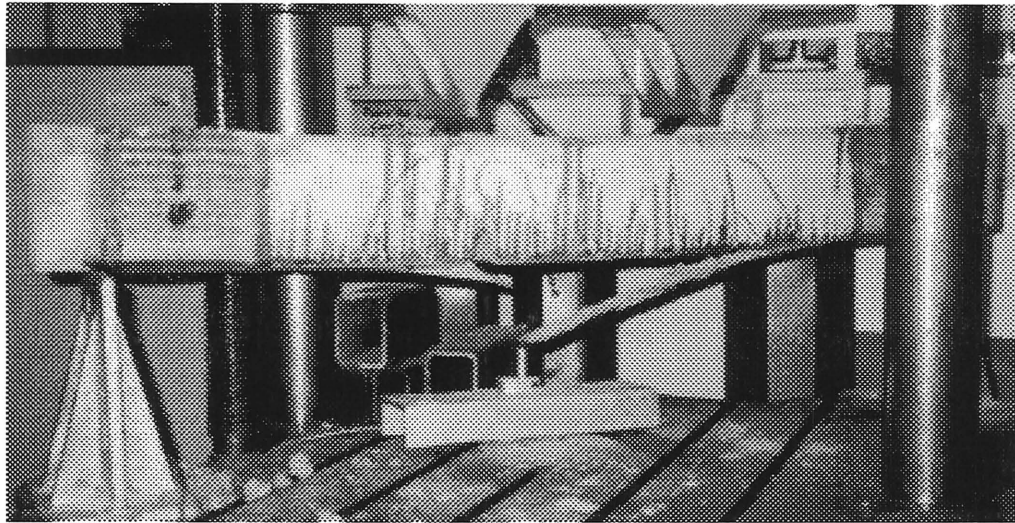


Figure 6.3 - Mode de rupture typique des poutres renforcées avec le Replark 20

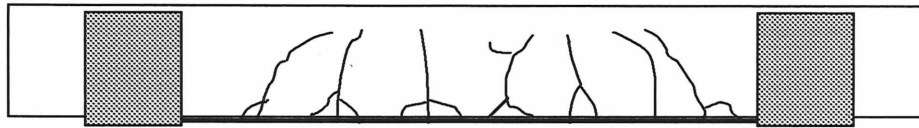


Figure 6.4 - Réseau de fissuration d'une poutre typique renforcée de Replark 20 (P0-Repla-A)

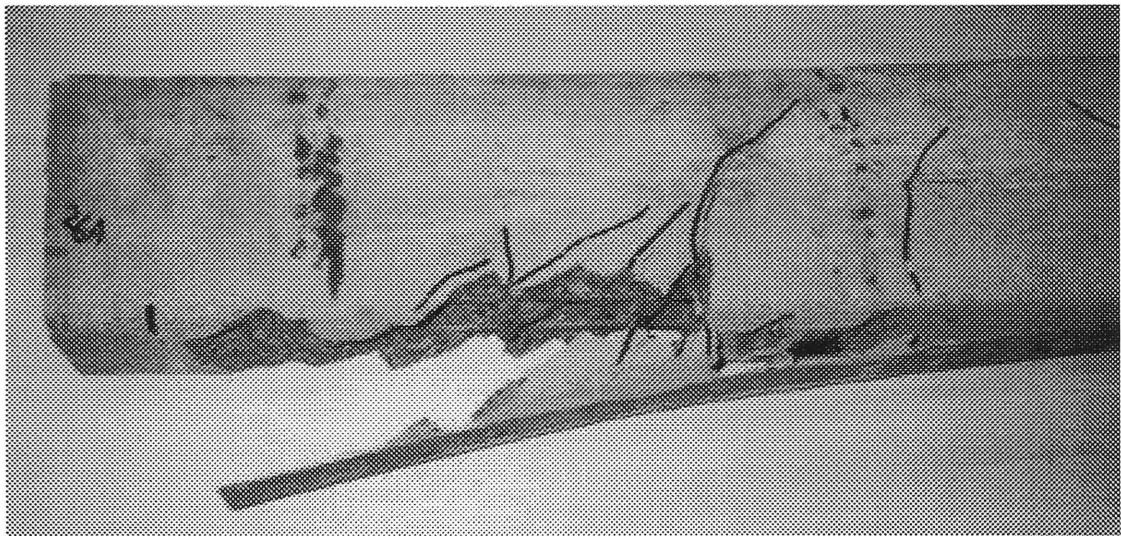


Figure 6.5 - Mode de rupture typique des poutres renforcées avec le Carbodur S

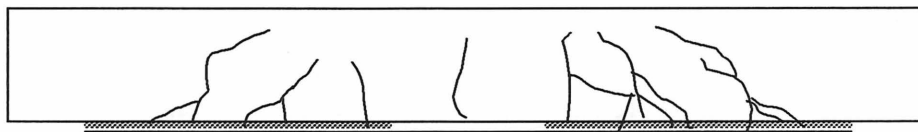


Figure 6.6 - Réseau de fissuration d'une poutre typique renforcée de Carbodur S (P13-Sika-A)

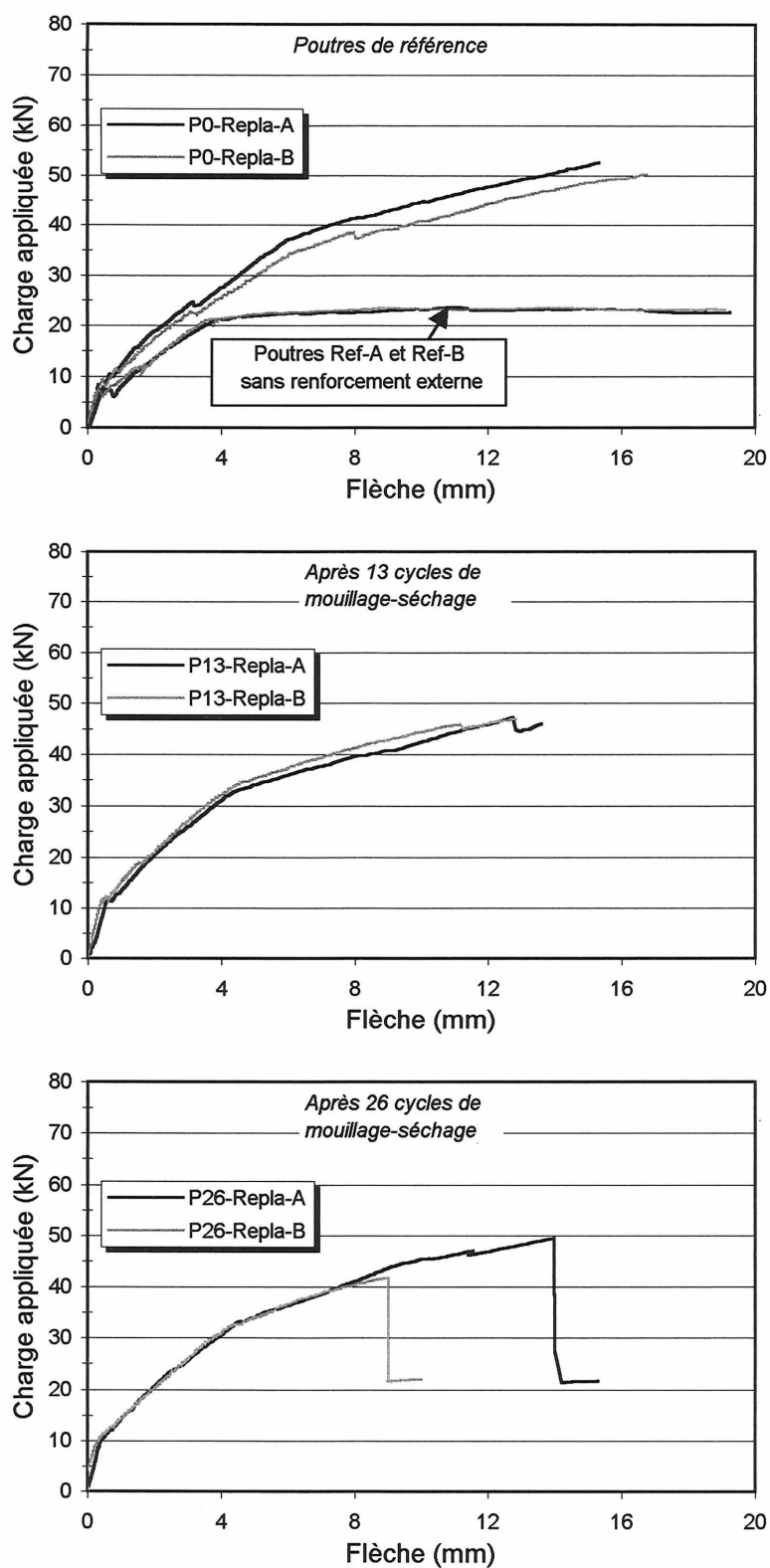


Figure 6.7 - Courbes charge-flèche des poutres renforcées de Replark 20

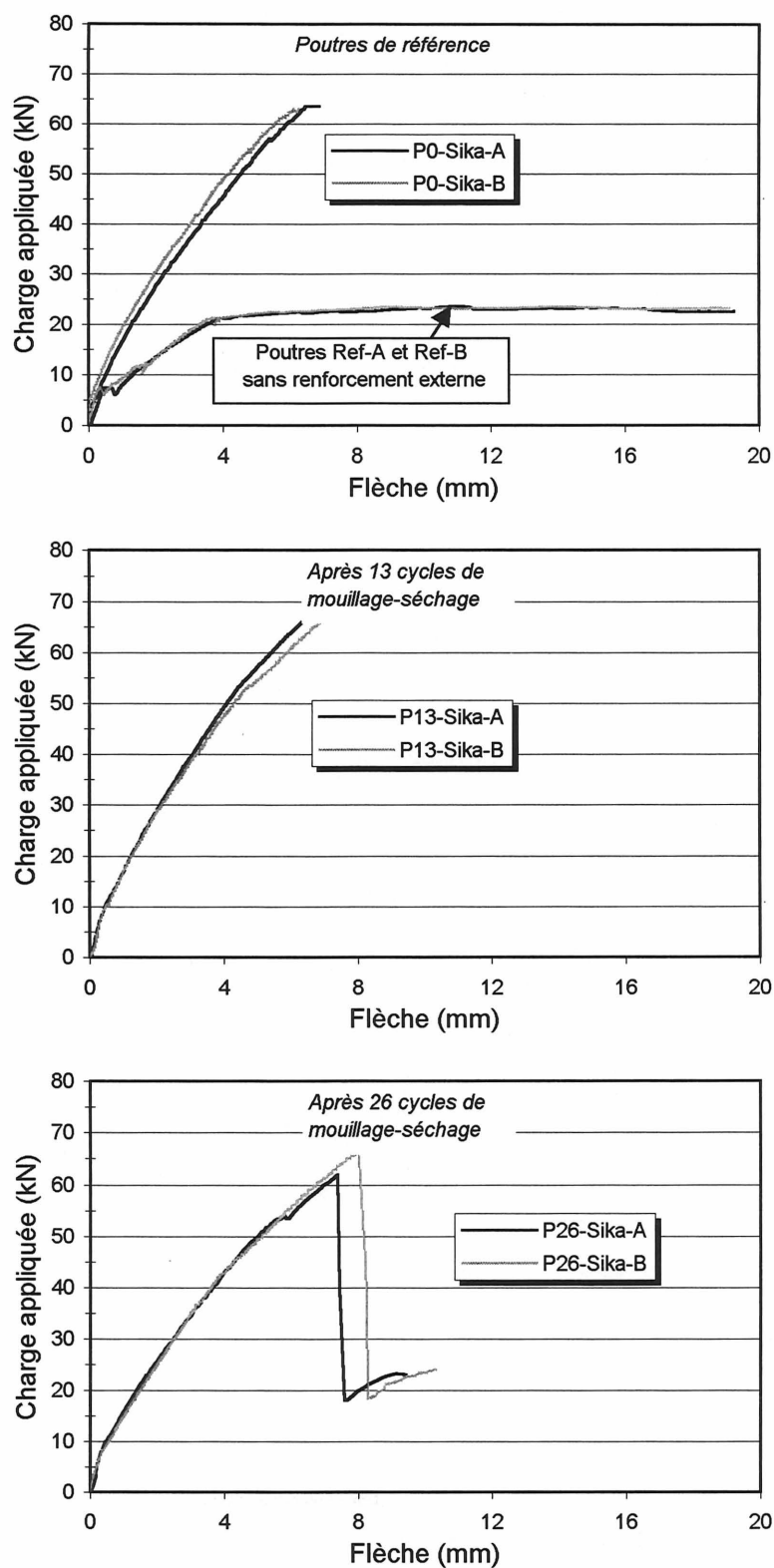


Figure 6.8 - Courbes charge-flèche des poutres renforcées de Carbodur S

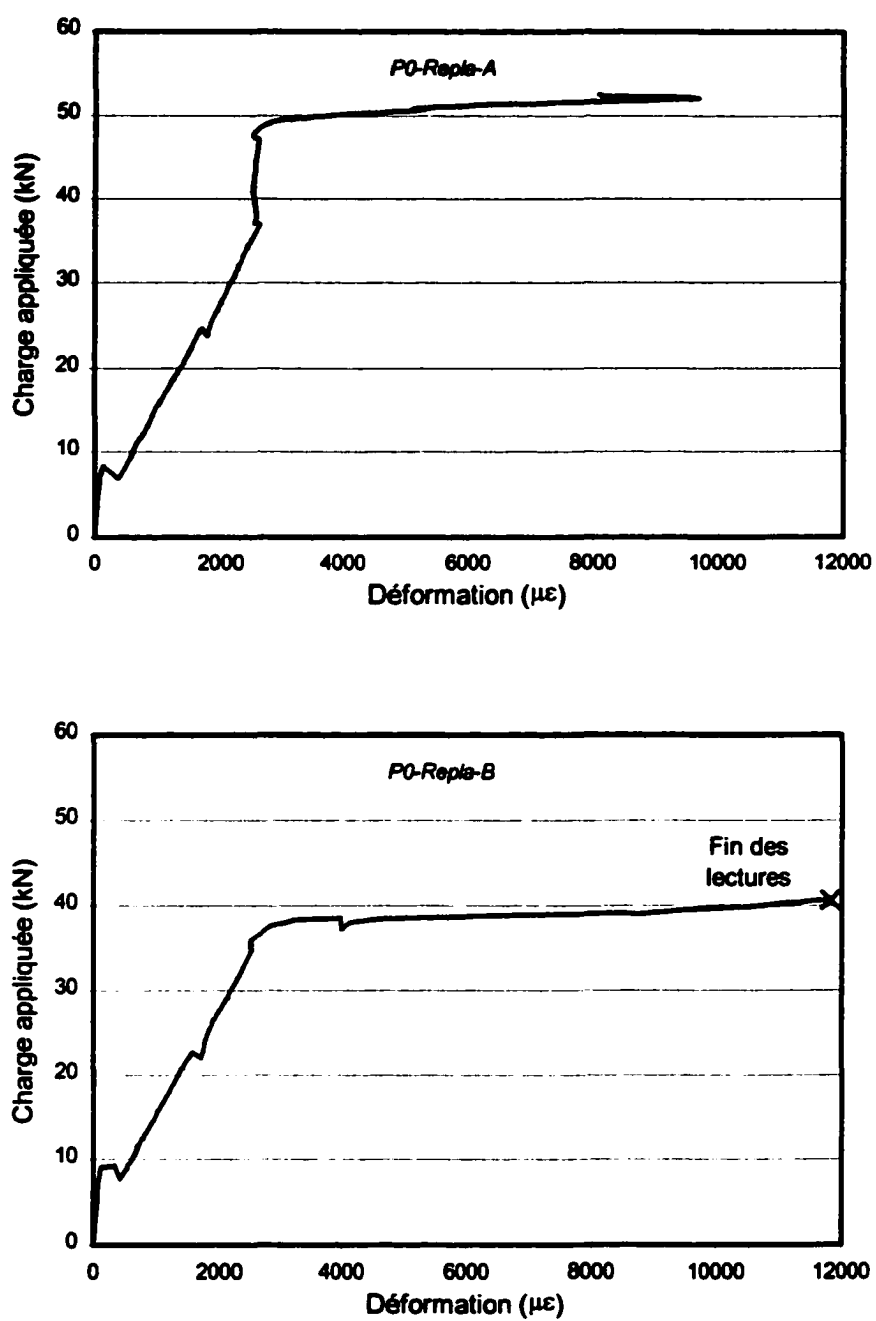


Figure 6.9 - Déformations de l'acier d'armature pour deux poutres renforcées de Replark 20

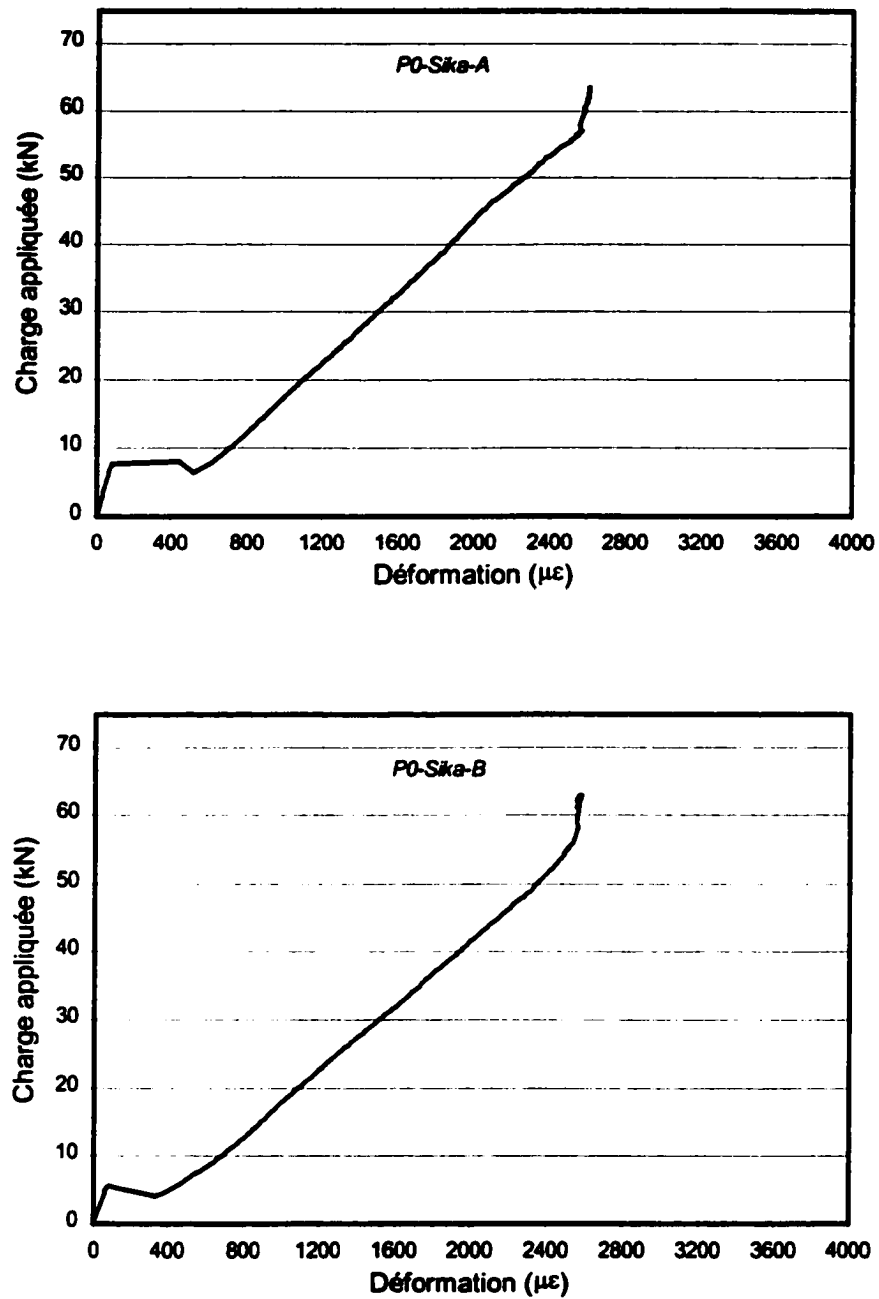


Figure 6.10 - Déformations de l'acier d'armature pour deux poutres renforcées de Carbodur S

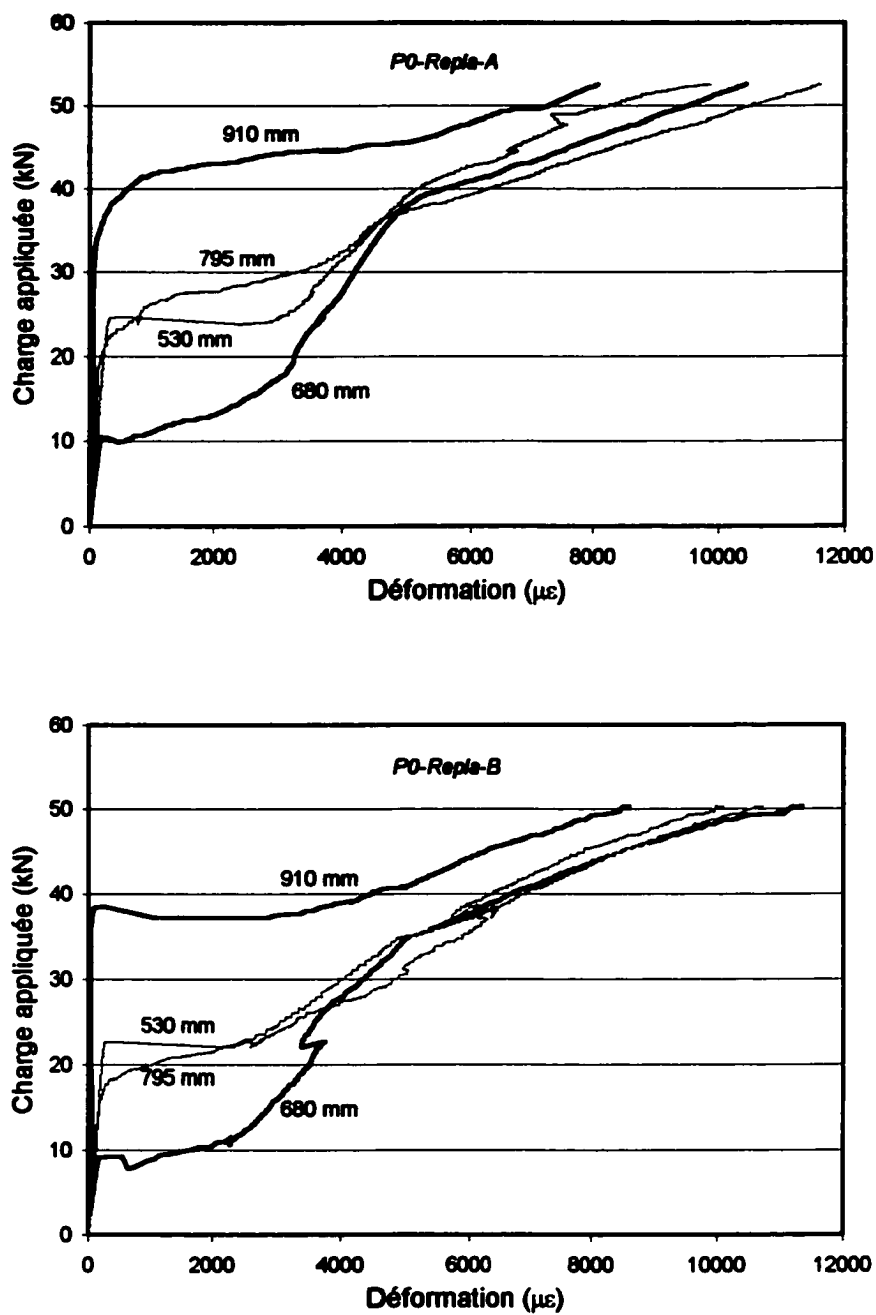


Figure 6.11 - Charge appliquée et déformations du Replark 20 pour les poutres de contrôle

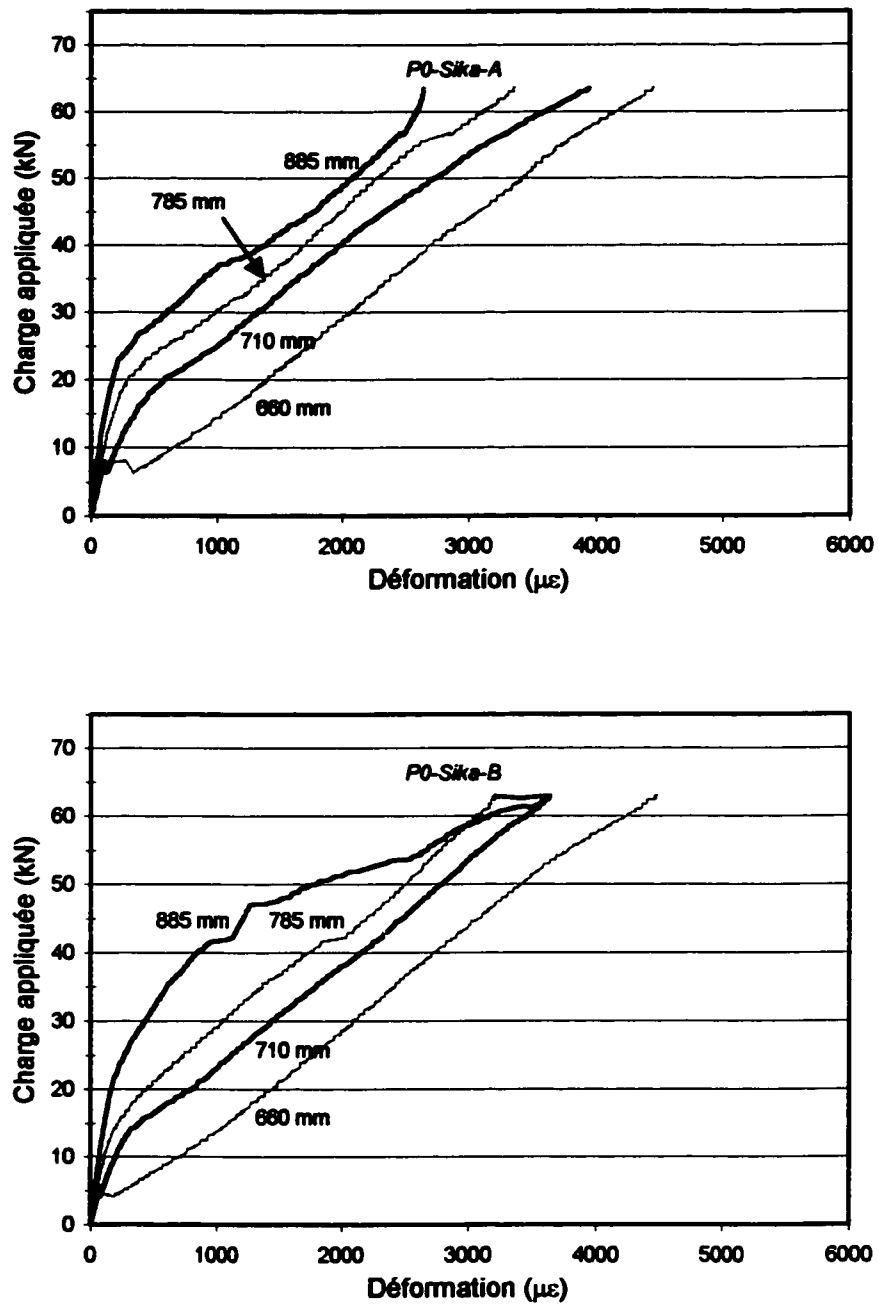


Figure 6.12 - Charge appliquée et déformations du Carbodur S pour les poutres de contrôle

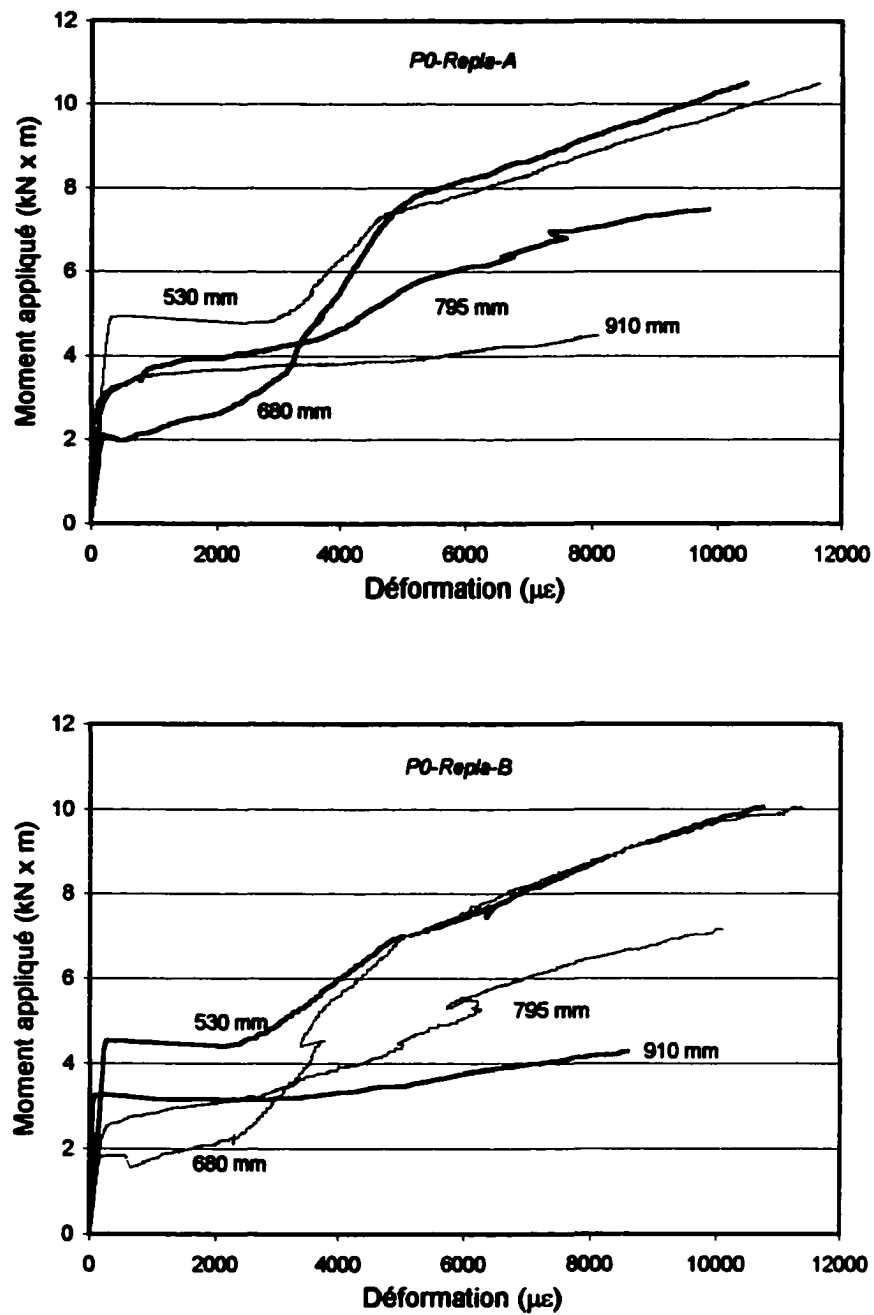


Figure 6.13 - Moment appliqué et déformations du Replark 20 pour les poutres de contrôle

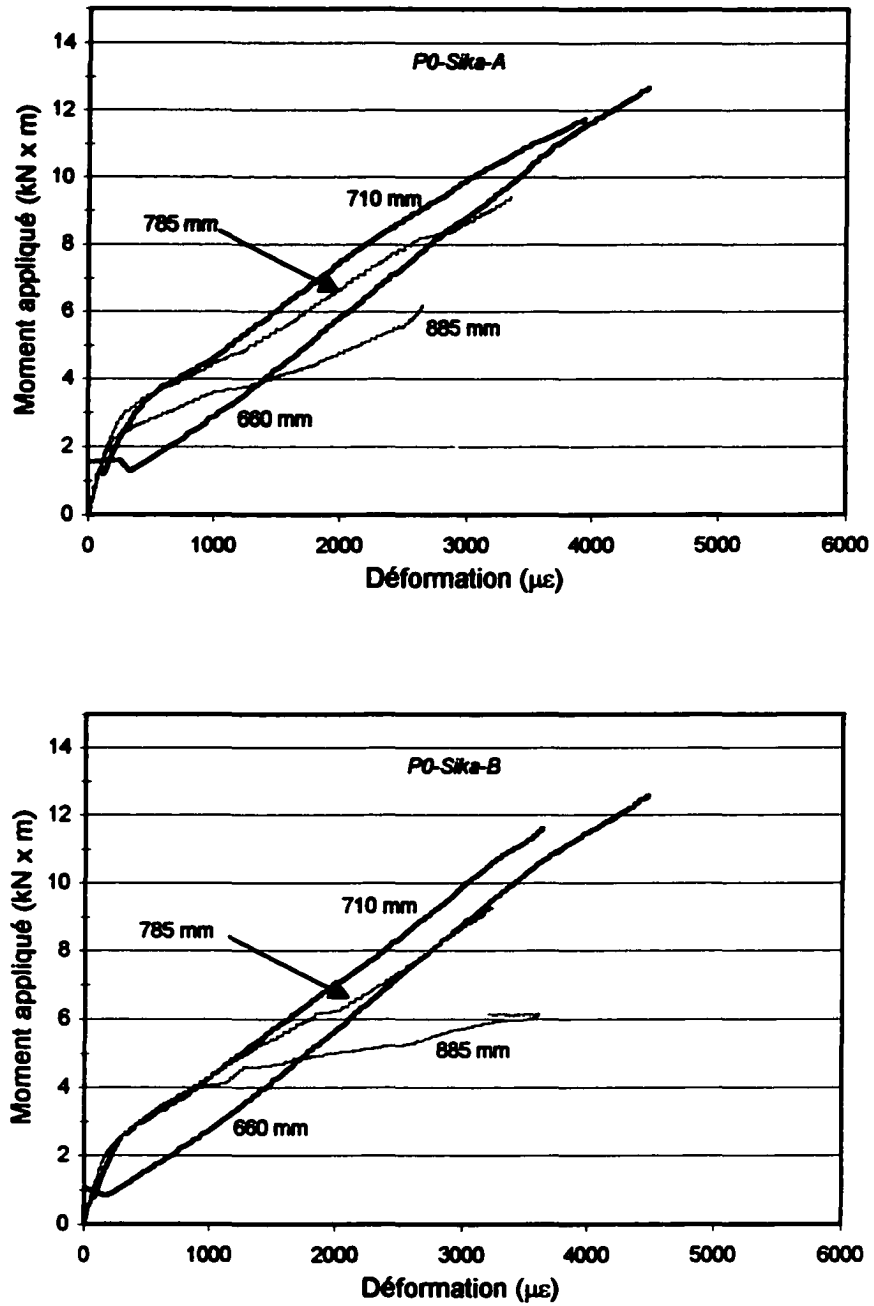


Figure 6.14 - Moment appliqué et déformations du Carbodur S pour les poutres de contrôle

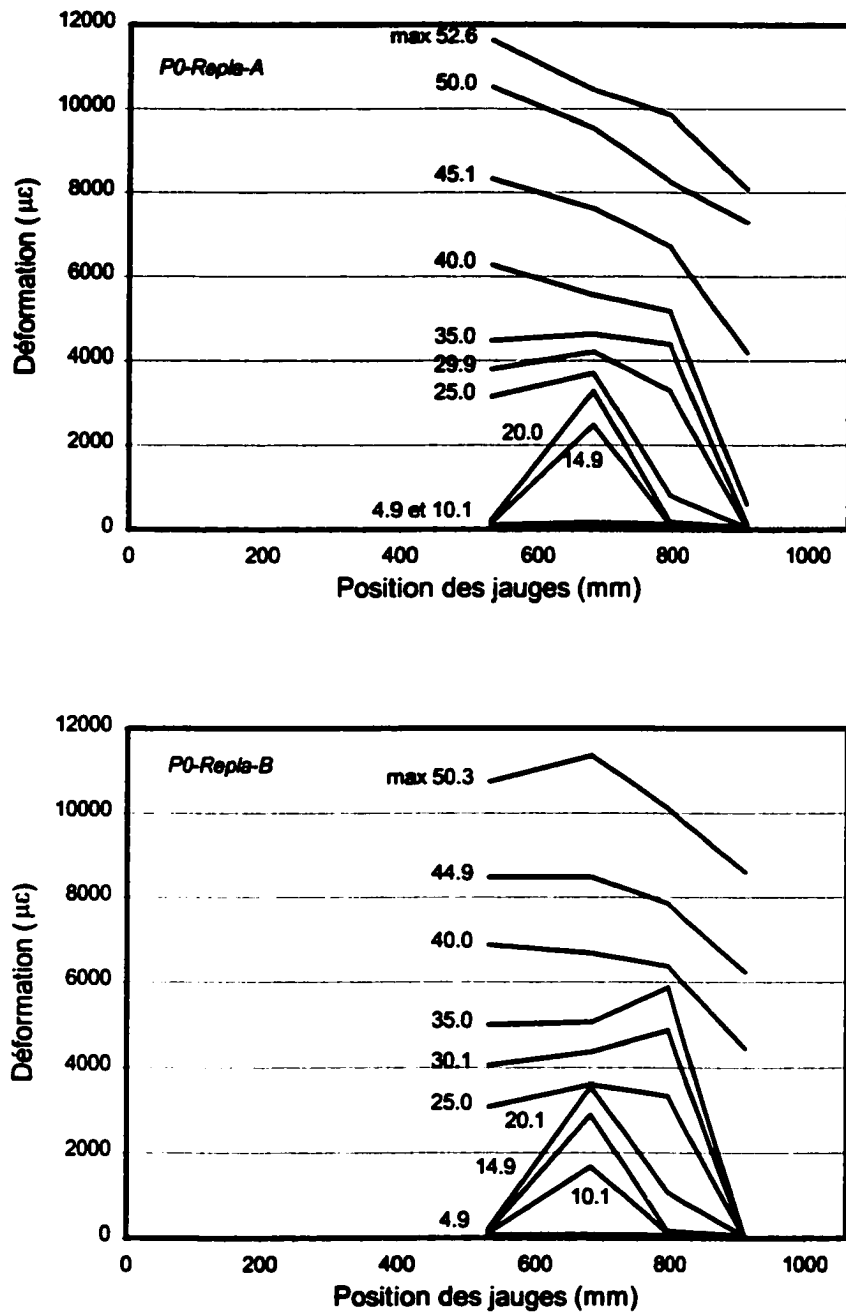


Figure 6.15 - Profil des déformations le long du Replark 20 pour les poutres de contrôle en fonction de la charge appliquée

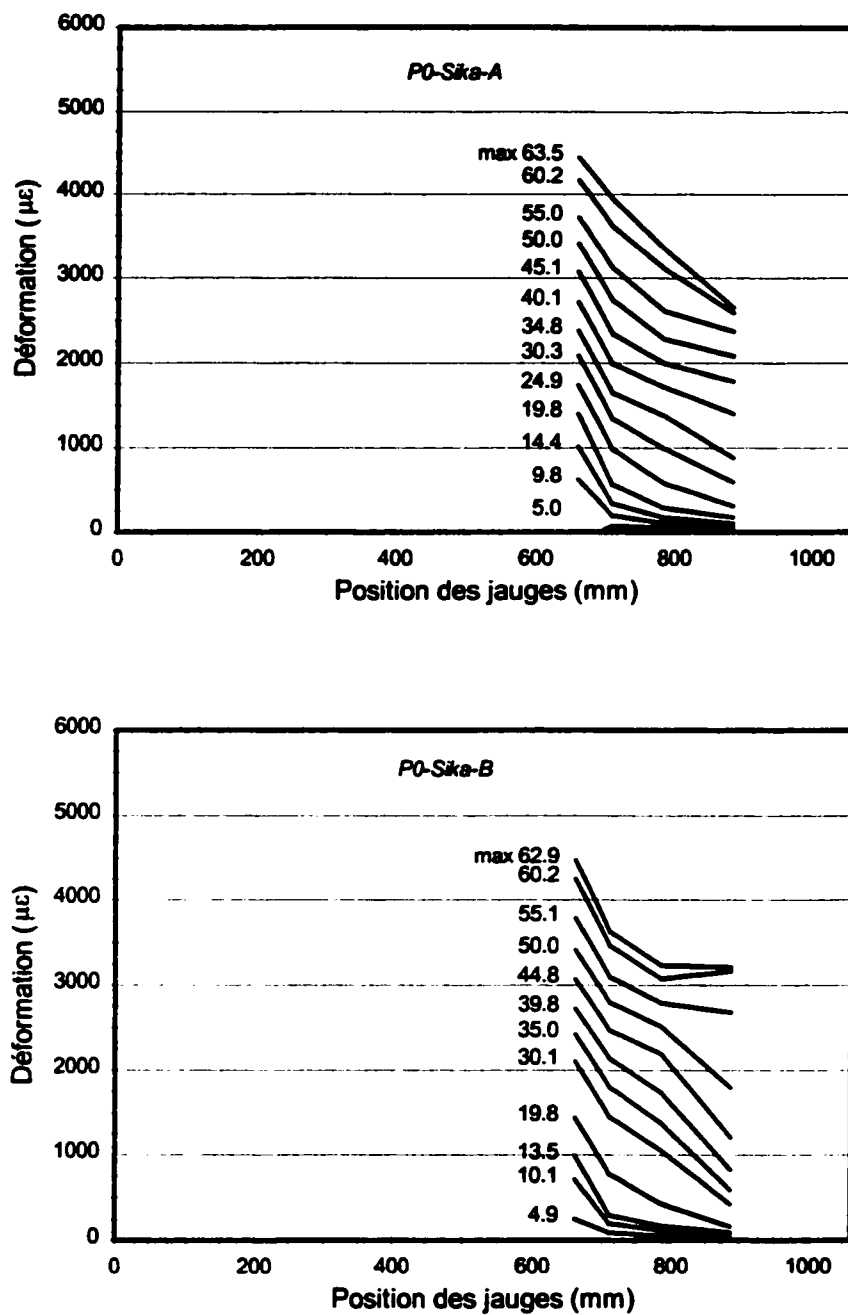


Figure 6.16 - Profil des déformations le long du Carbodur S pour les poutres de contrôle en fonction de la charge appliquée

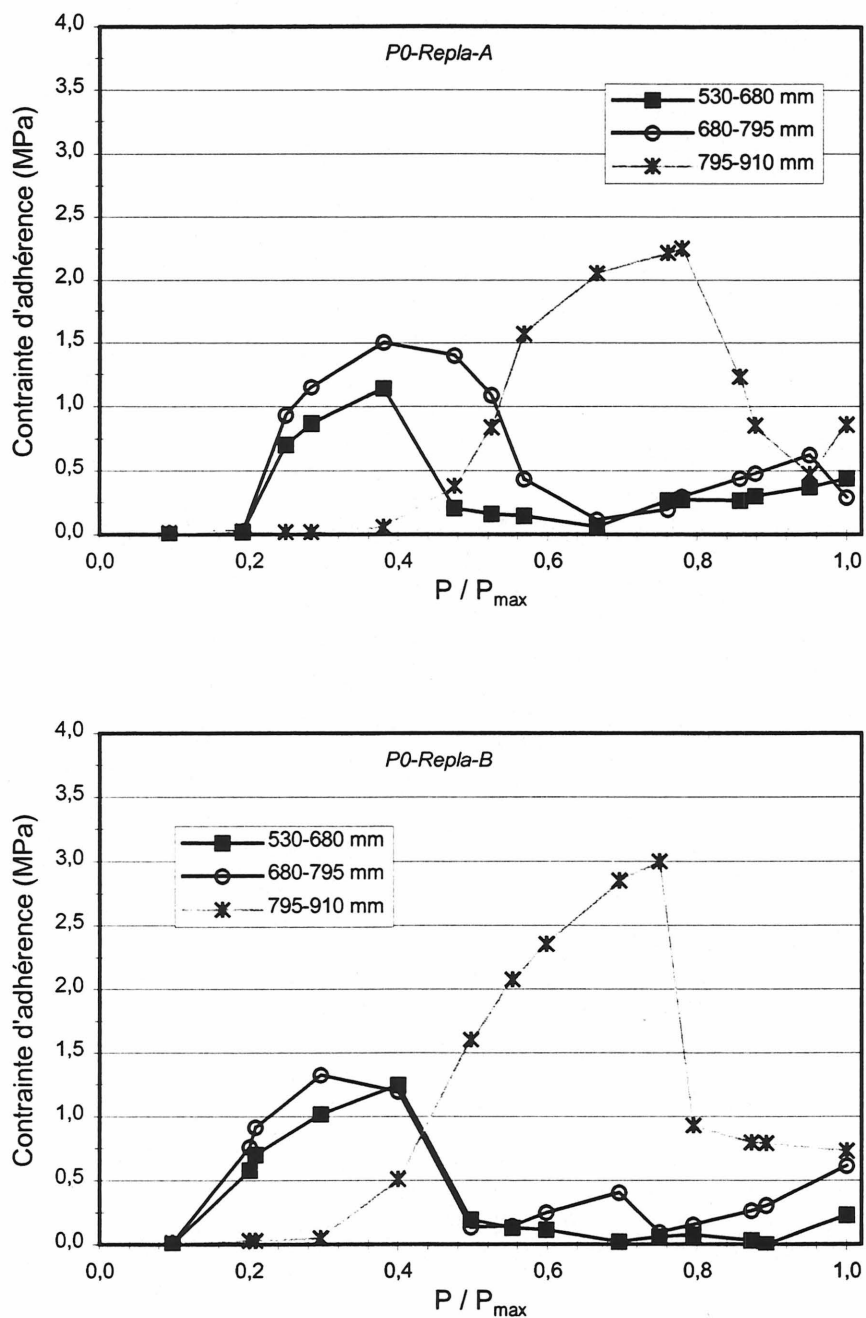


Figure 6.17 - Contraite d'adhérence en fonction du niveau relatif du chargement des poutres de contrôle Replark 20

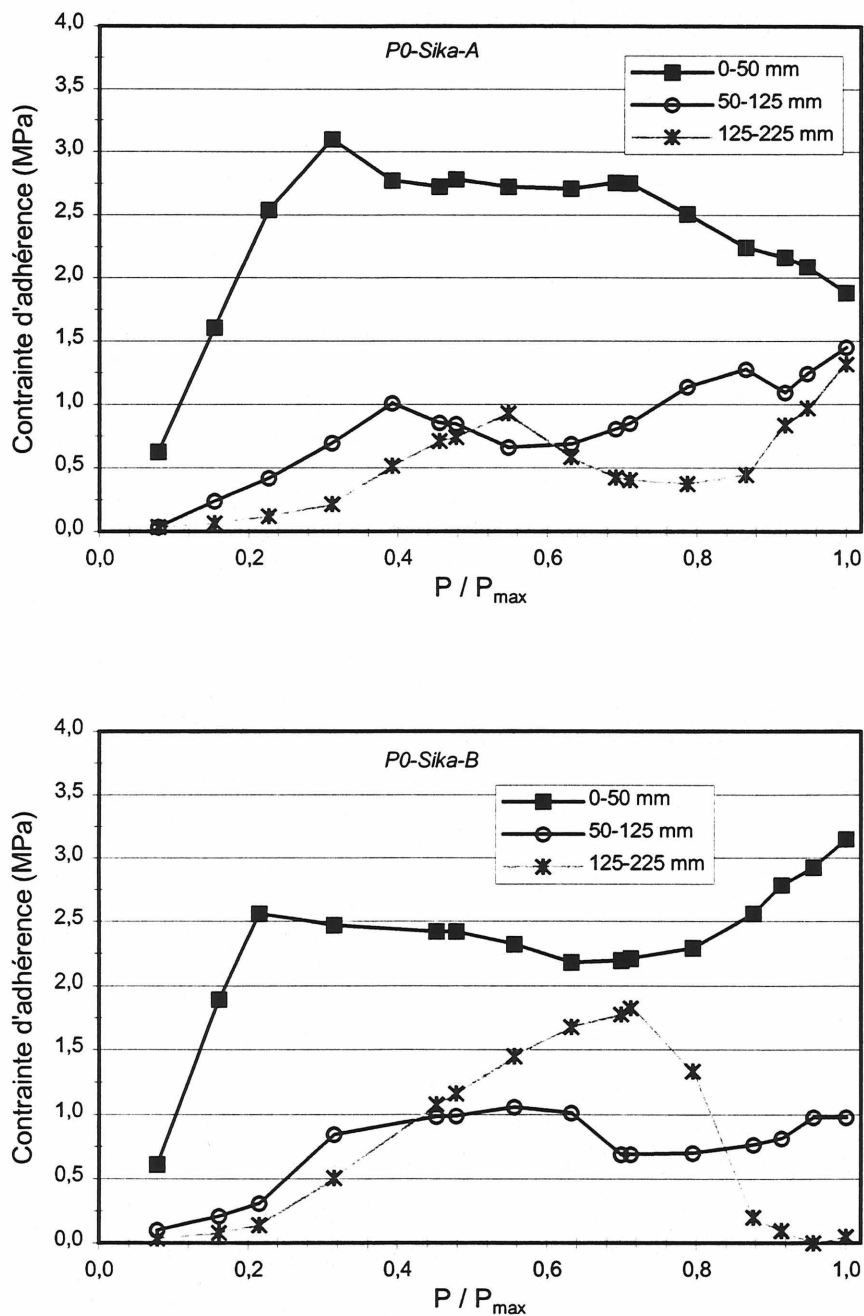


Figure 6.18 - Contrainte d'adhérence en fonction du niveau relatif du chargement des poutres de contrôle Carbodur S

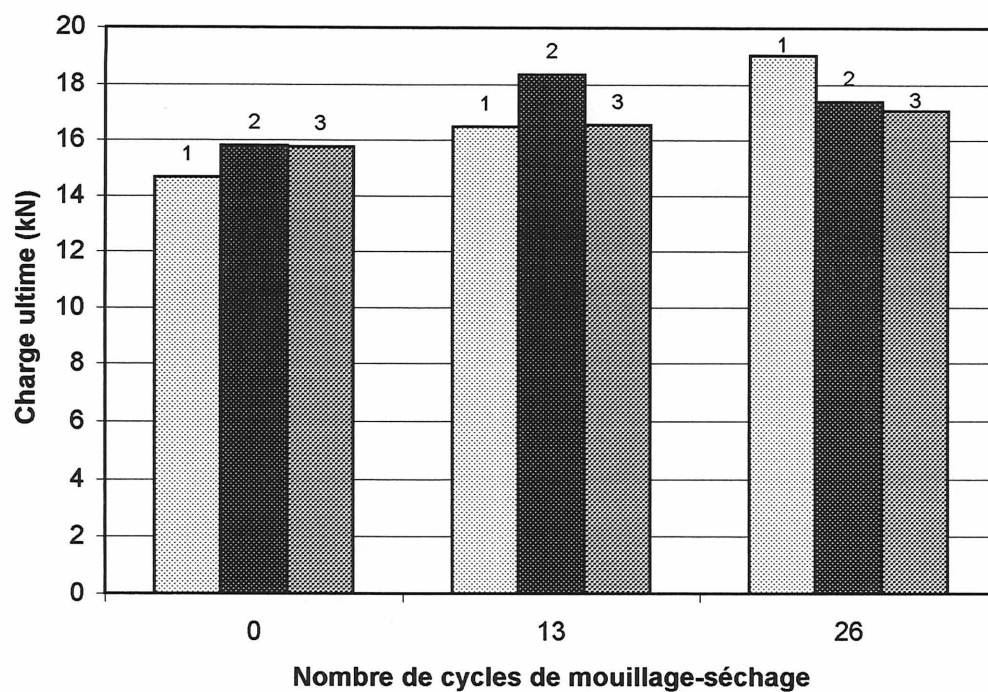


Figure 6.19 - Charge ultime des blocs avec le Replark 20

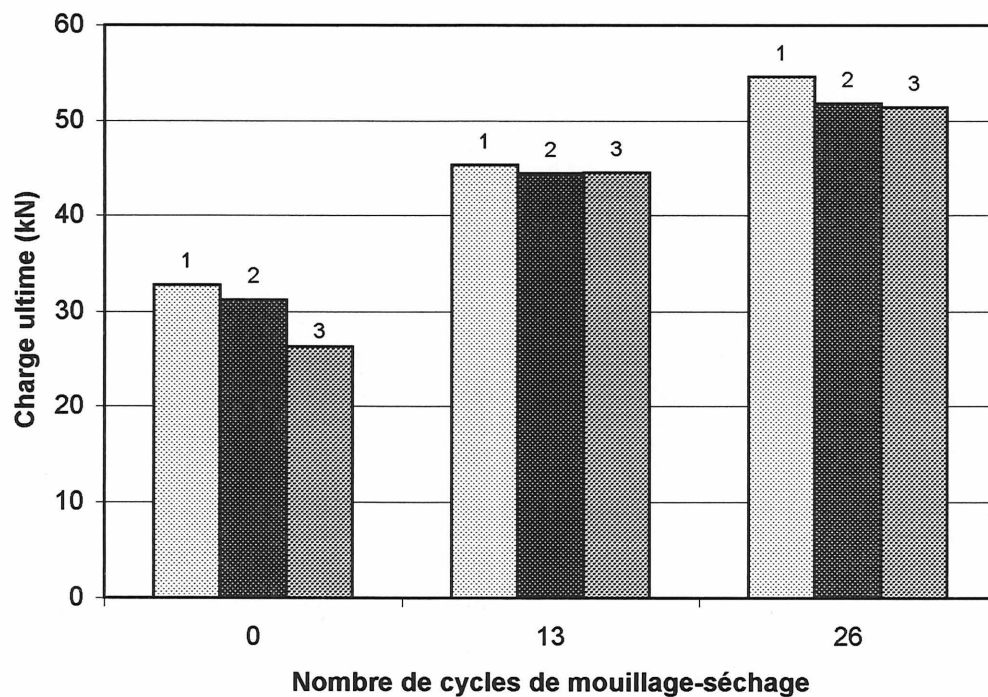


Figure 6.20 - Charge ultime des blocs avec le Carbodur S

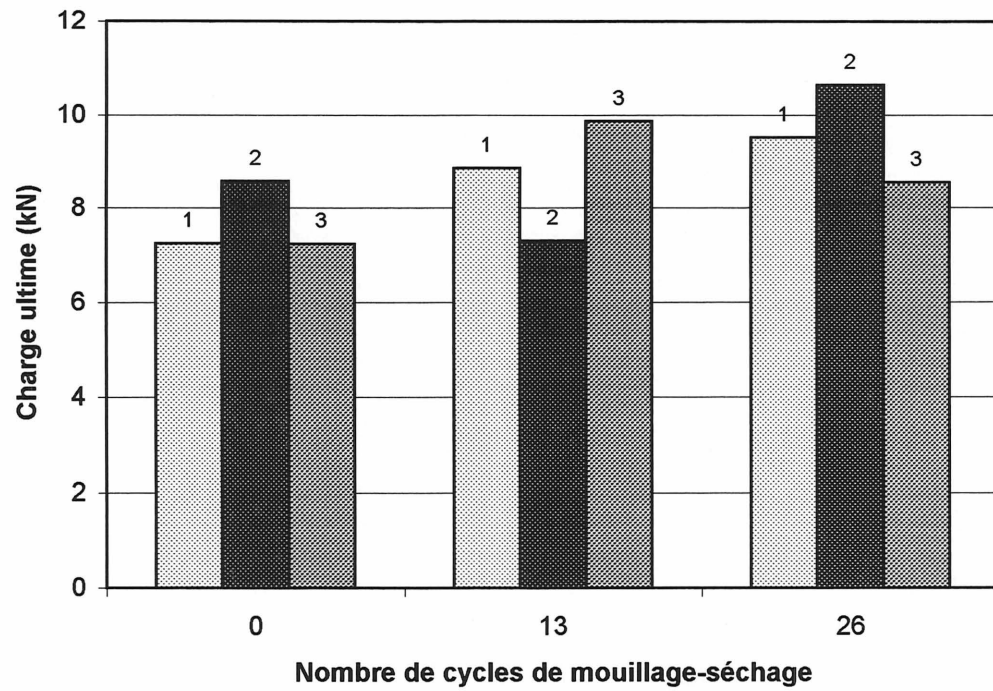


Figure 6.21 - Charge ultime des blocs avec le Fibrwrap

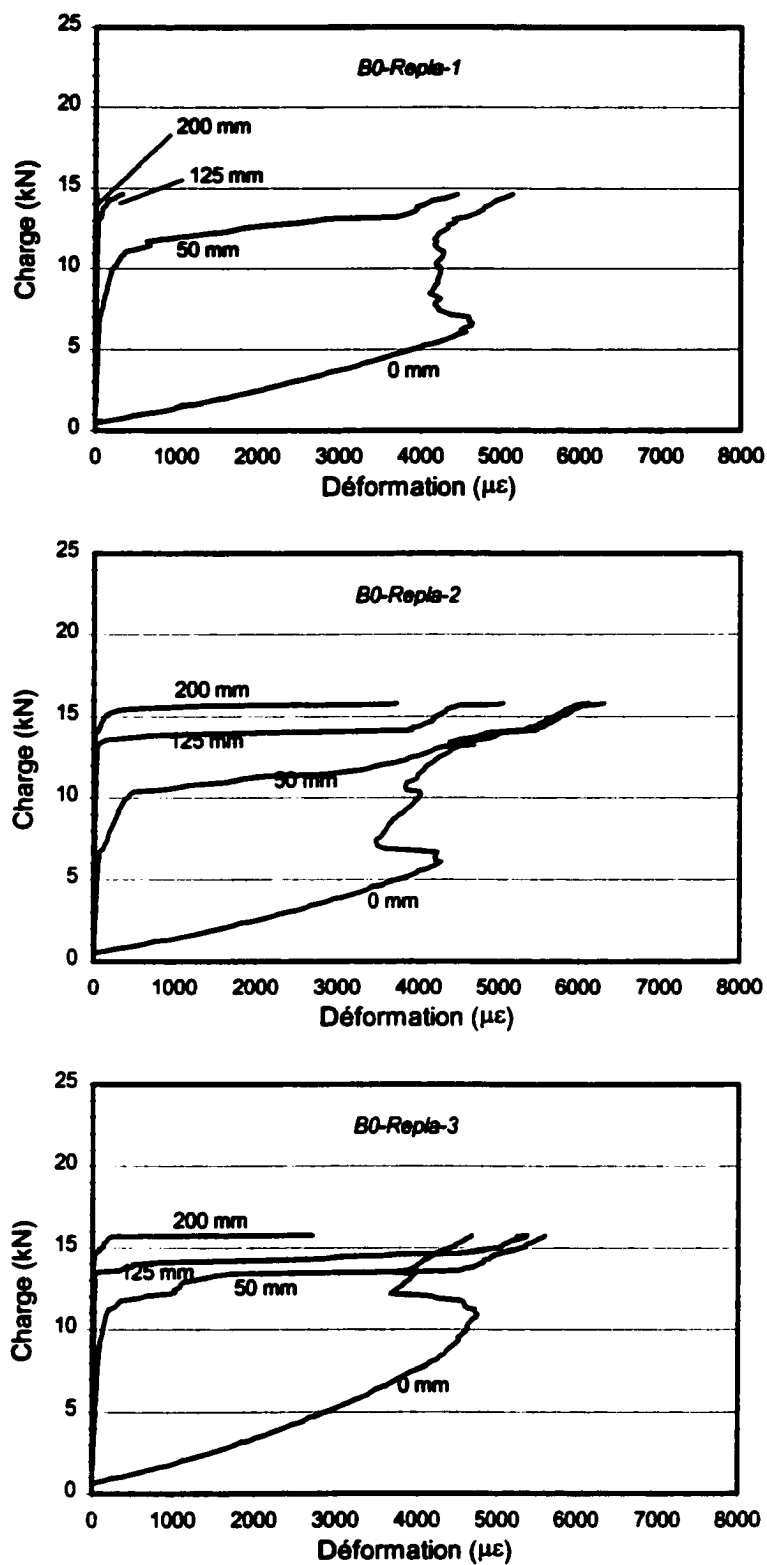


Figure 6.22 - Charge appliquée et déformations du Replark 20 pour les blocs de référence

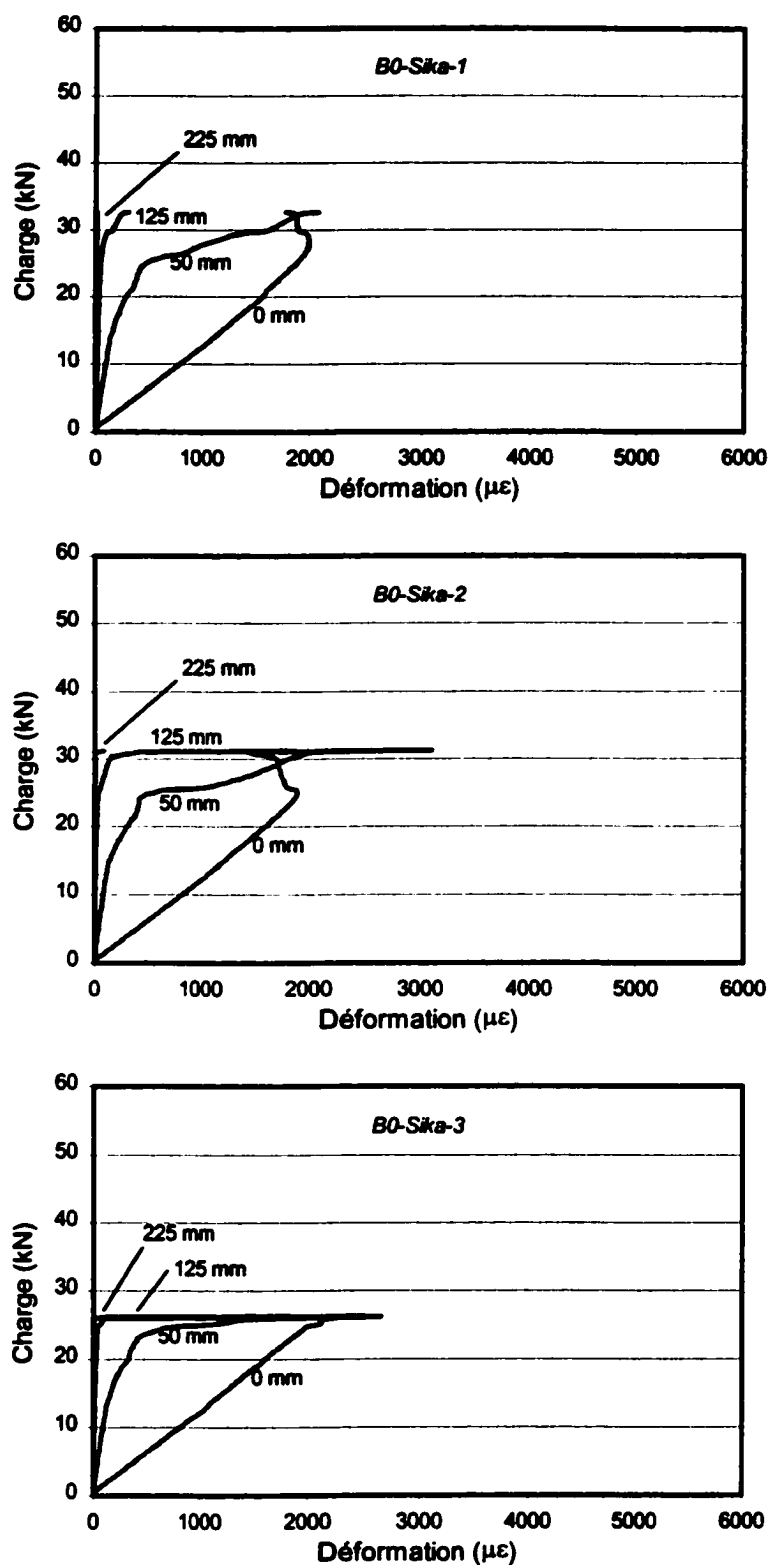


Figure 6.23 - Charge appliquée et déformations du Carbodur S pour les blocs de référence

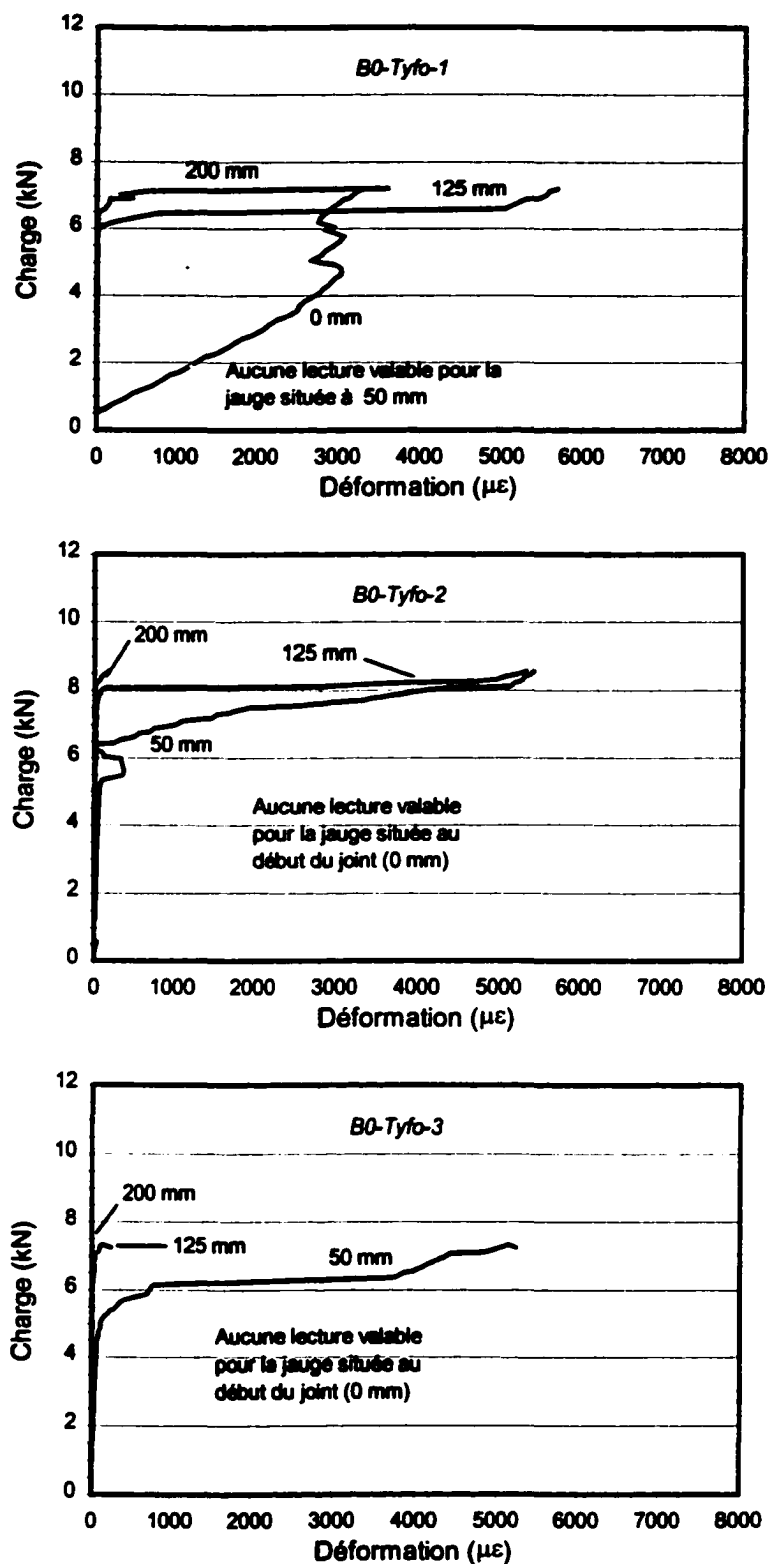


Figure 6.24 - Charge appliquée et déformations du Fibrwrap pour les blocs de référence

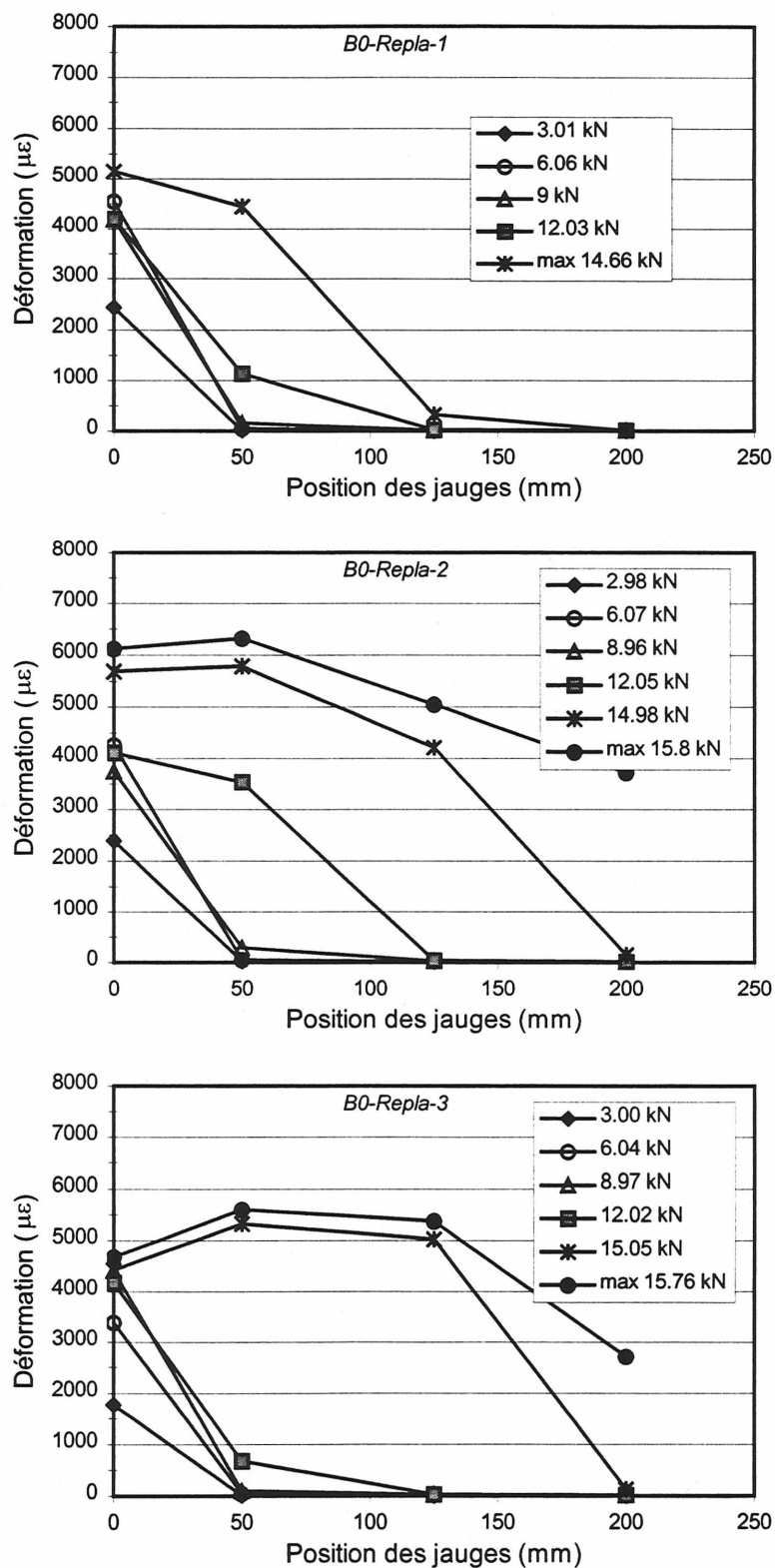


Figure 6.25 - Profil des déformations le long du Replark 20 pour les blocs de référence en fonction de la charge appliquée

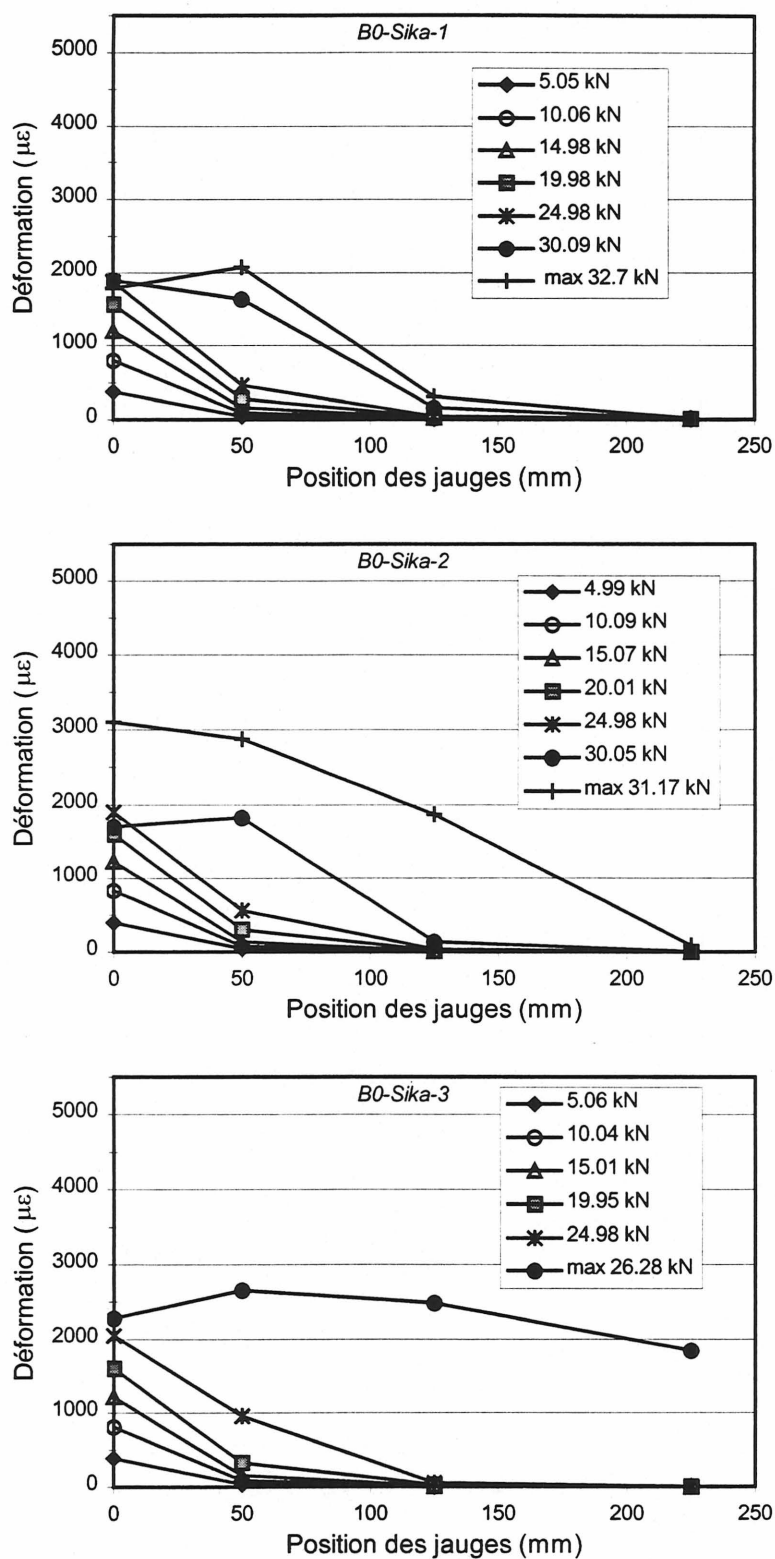


Figure 6.26 - Profil des déformations le long du Carbudur S pour les blocs de référence en fonction de la charge appliquée

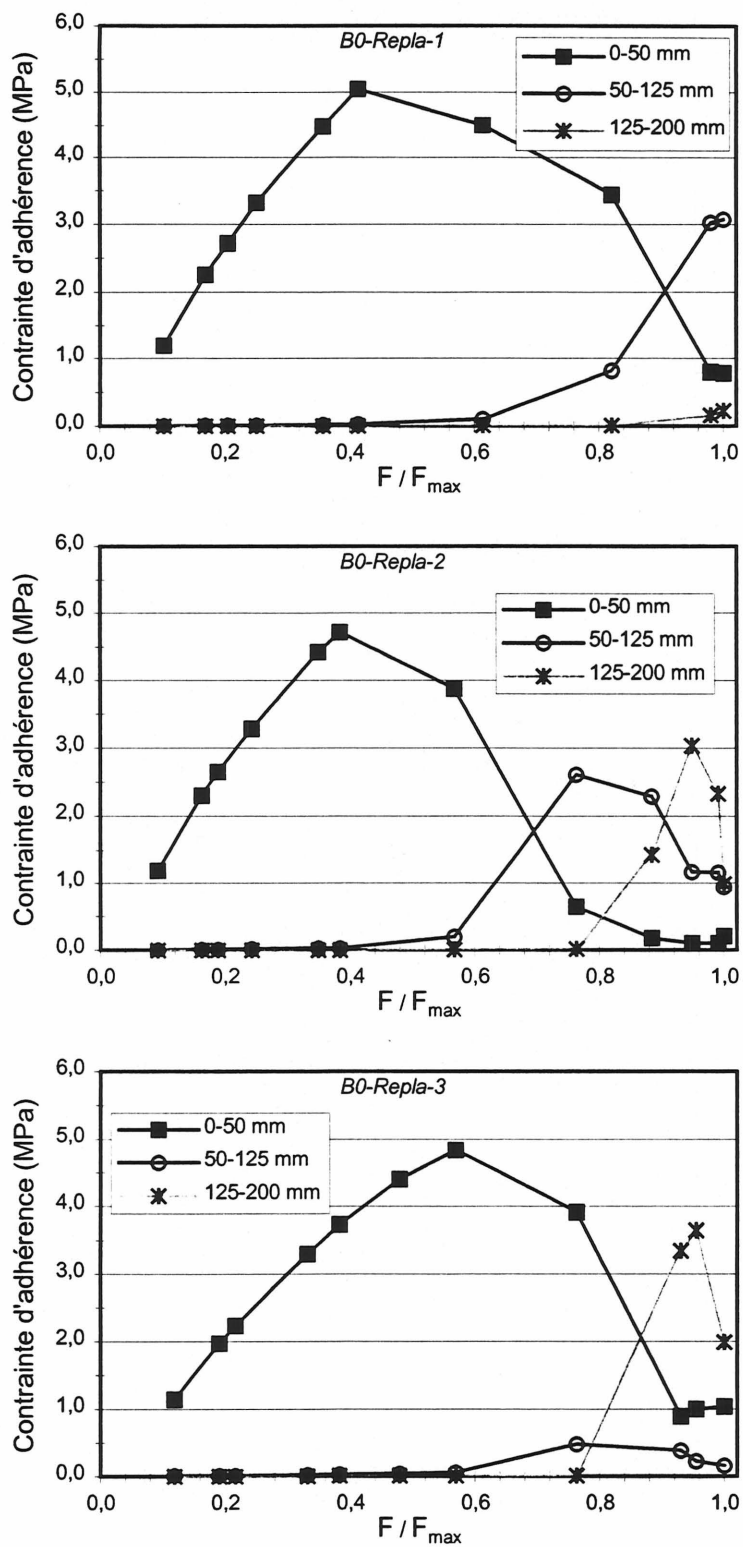


Figure 6.27 - Contrainte d'adhérence en fonction du niveau relatif du chargement des blocs de référence Replark 20

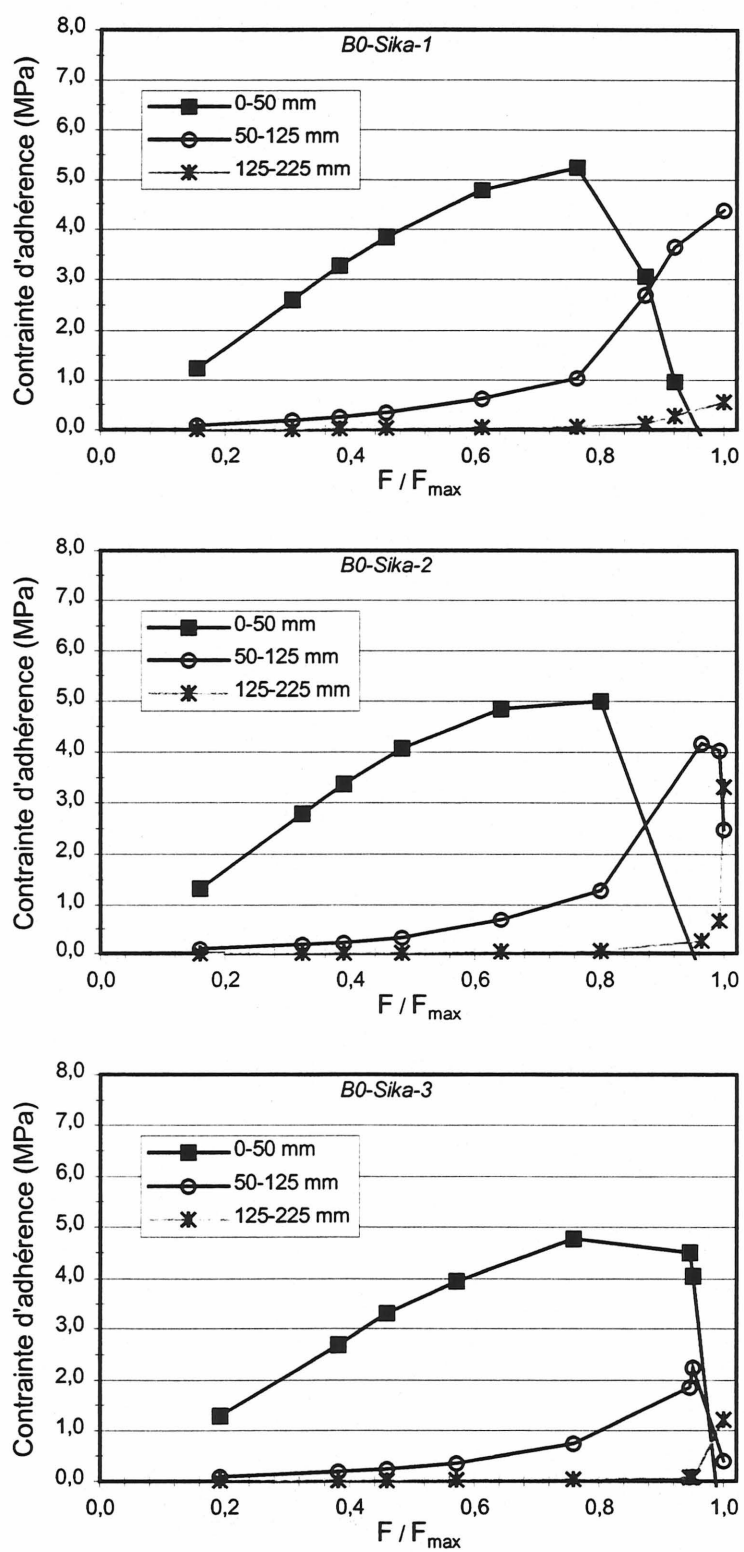


Figure 6.28 - Contrainte d'adhérence en fonction du niveau relatif du chargement des blocs de référence Carbodur S

Chapitre 7

EFFETS DES CYCLES DE GEL-DÉGEL SUR L'INTERFACE COMPOSITE-BÉTON

Les résultats de l'étude portant sur la vérification de l'endommagement du matériau composite et de l'affaiblissement de l'interface composite-béton à la suite de l'exposition accélérée aux cycles de gel-dégel sont présentés dans ce chapitre. Comme au chapitre 6, les différentes données obtenues à l'aide des instruments de mesure sont interprétées à partir de graphiques et de tableaux. Les principaux résultats sont présentés dans ce chapitre et les autres ont été reportés à l'annexe D.

7.1 Paramètres de l'analyse

Des échantillons poutres et blocs ont subi la même exposition aux cycles de gel-dégel et ont été testés respectivement par un essai de flexion et un essai d'arrachement. Rappelons que seules les lamelles Carbodur S ont été étudiées pour ce type d'exposition. Les essais de flexion sur les poutres renforcées ont été effectués dans le laboratoire de l'Université Queen's alors que les blocs ont été ramenés à l'Université de Sherbrooke et testés avec le montage adapté.

En ce qui concerne les essais de flexion sur les poutres, la discussion portera sur la charge ultime, la fissuration et le mode de rupture qui est survenu. Les réponses présentées sur ces graphiques portent sur la charge en fonction de la flèche, la charge en fonction de la déformation dans le composite, le moment en fonction de la déformation dans le composite et la position de l'axe neutre.

Pour ce qui est des essais d'arrachement sur les blocs, une discussion sur la charge ultime et sur leur mode de rupture est tout d'abord présentée. De même, l'analyse des différentes données obtenues avec ce type d'expérimentation est effectuée à partir de graphiques.

Tout comme au chapitre précédent, l'élément majeur de cette étude concerne la vérification de la qualité de l'interface composite-béton. Une analyse du profil des déformations et de l'évolution de la contrainte d'adhérence est effectuée à la fin de chaque section. Mentionnons que les grandes lignes de cette analyse sont telles que décrit à la section 6.1.

7.2 Cycles de gel-dégel sur les poutres

7.2.1 Résultats des essais de flexion

Les résultats des essais de flexion sur les poutres après 0, 50, 150 et 300 cycles de gel-dégel sont présentés au tableau 7.1. Ce tableau regroupe les données concernant la charge de fissuration, la charge ultime, la déformation maximale dans le composite observée à la charge ultime ainsi que la flèche au centre.

7.2.2 Charge ultime

La figure 7.1 illustre la charge ultime atteinte pour chacune des poutres en fonction du nombre de cycles subi. Il est remarqué que la capacité des poutres augmente avec les cycles de gel-dégel. Après 50, 150 et 300 cycles, la charge ultime moyenne augmente respectivement de 2.7 %, 10 % et de 19.7 % par rapport à celle des poutres de contrôle.

7.2.3 Observations sur la fissuration et le mode de rupture

Le mode de rupture observé est le même pour l'ensemble des poutres. La rupture s'est produite à cause du cisaillement près de l'interface composite-béton et a entraîné le décollement d'une surface de béton à une extrémité de la bande de Carbodur. À l'annexe D, les figures D.1 à D.3 nous montrent le mode de rupture qui est survenu sur l'ensemble des poutres. Il est à souligner

que ce décollement est moins important que celui observé avec les poutres soumises à des cycles de mouillage-séchage. La figure 7.2 présente un aperçu de la fissuration des poutres à l'ultime. Il a été observé que le réseau de fissures est comparable à celui obtenu avec les poutres de mouillage-séchage. Notons que le béton ne semble pas avoir été affecté par les cycles de gel-dégel.

7.2.4 Charge-flèche

Les figures 7.3 et 7.4 illustrent les courbes charge-flèche obtenues expérimentalement pour l'ensemble de ces poutres. En dépit des cycles, leurs réponses en flexion sont similaires. Il faut prendre note qu'un problème avec la poutre P50-Sika-2 a entraîné l'arrêt de l'essai en cours, et a obligé de reprendre le chargement.

7.2.5 Charge-déformation dans le composite

Les courbes charge-déformation sont présentées à la figure 7.5 pour les poutres de contrôle P0. Celles concernant les poutres ayant subi les cycles sont données aux figures D.4 à D.6. Il est remarqué que les courbes sont presque toutes identiques. Rappelons qu'à la figure 5.11, la disposition des jauges est montrée. La disposition symétrique des jauges sur la lamelle de renforcement des poutres P0 et P50 avait pour but de vérifier s'il y avait une distribution symétrique de la déformation au cours du chargement. Après vérification, il est constaté qu'une jauge située d'un côté comme de l'autre donne quasiment la même déformation.

7.2.6 Moment-déformation dans le composite

La figure 7.6 illustre le moment appliqué et les déformations du matériau composite obtenues selon la position des jauges d'un côté seulement. D'après la statique, pour un même moment, les déformations dans le matériau composite devraient être identiques le long de la poutre. En théorie, les courbes devraient donc se superposer. Selon les courbes expérimentales, seulement la portion avant le moment de fissuration respecte cette théorie. Des courbes semblables sont présentées aux figures D.7 à D.9 pour les poutres soumises aux cycles de gel-dégel.

7.2.7 Profil des déformations

Les figures 7.7 et de D.10 à D.12 présentent les lectures obtenues des jauges de déformation au fur et à mesure que le chargement augmente. Encore une fois, avant la fissuration au niveau du joint (25-30 kN), la déformation subit une diminution exponentielle. Il est à noter que sur deux poutres, P150-Sika-1 et P300-Sika-3, trois jauges supplémentaires ont été installées sur le joint, diminuant ainsi l'espacement entre celles-ci. Cette disposition plus rapprochée avait pour but d'obtenir un meilleur profil des déformations. Avec ou sans cycle de gel-dégel, les profils sont très similaires.

7.2.8 Évolution de la contrainte d'adhérence

Toujours à partir de l'équation 6-1 et du profil des déformations mesurées sur le composite, la contrainte d'adhérence est ainsi calculée. La figure 7.8 montre l'évolution et la valeur de la contrainte d'adhérence le long du joint en fonction du niveau relatif du chargement P/P_{max} . Cette contrainte d'adhérence a été établie à partir des mêmes niveaux de chargement indiqués à la figure 7.7.

Pour les poutres ayant un plus grand nombre de jauges (P150-Sika-1 et P300-Sika-3), la distribution de la contrainte d'adhérence est un peu plus précise mais ne nous apporte pas nécessairement de l'information supplémentaire. En comparant les figures 7.8, D.13, D.14 et D.15, il n'y a pas de différences significatives qui justifient a priori l'augmentation observée de la charge ultime.

7.2.9 Position de l'axe neutre

Les données obtenues à partir des plots DEMEC situés sur la section centrale de certaines poutres avaient pour but de nous renseigner sur la position de l'axe neutre. La position de l'axe neutre a été évaluée pour différentes charges jusqu'à la rupture, et est illustrée aux figures D.16 et D.17. Avec cette information, il serait possible d'obtenir la relation moment-courbure, en effectuant une régression des données recueillies, mais à cause de différences importantes entre certaines données, cette analyse n'a pas été effectuée. Sur ces graphiques, la valeur de la déformation du

composite (section non collée) a été ajoutée afin de vérifier s'il y avait compatibilité des déformations. La non linéarité des déformations peut être attribuable à l'absence de continuité entre la plaque et la section de béton au centre de la poutre.

7.3 Cycles de gel-dégel sur les blocs

7.3.1 Résultats des essais d'arrachement

Le tableau 7.2 présente le sommaire des résultats des essais d'arrachement sur les blocs après 0, 50, 150 et 300 cycles de gel-dégel. Ce tableau regroupe les données sur la charge ultime, la déformation maximale correspondante dans le composite ainsi que la position de la jauge où cette valeur a été observée.

7.3.2 Charge ultime et observations sur le mode de rupture

La figure 7.9 exprime la valeur de la charge ultime obtenue en relation avec le nombre de cycles subis. Les valeurs obtenues dans le cadre de ces essais sont très comparables à celles des essais de mouillage-séchage. La charge moyenne observée pour les blocs de contrôle est de 33.9 kN. Alors que la charge moyenne d'arrachement pour les blocs après 50 cycles est de 46.1 kN, après 150 cycles 51.9 kN et après 300 cycles, elle est de 52.1 kN. Il en résulte donc une augmentation respective de 36 %, 53 % et de 54 % en rapport avec la valeur de contrôle. À la suite d'une observation visuelle des lamelles arrachées, on note une différence importante entre les blocs exposés aux cycles de gel-dégel et ceux non exposés. En fait, après 50, 150 et 300 cycles, il a été observé que presque la totalité du mortier adhésif demeure collé à la surface du bloc de béton. Les figures D.18 et D.19 nous présentent cette constatation pour les blocs de référence et ceux après l'imposition des cycles de gel-dégel. Mentionnons aussi que le béton ne semble pas avoir été affecté par les cycles de gel-dégel.

7.3.3 Charge-déformation dans le composite

Les courbes charge-déformation du composite, pour les blocs de référence, sont montrées à la figure 7.10. La figure 5.6 indiquait la disposition des jauges sur le joint, et rappelons que la jauge

située à 0 mm est située au début du joint. Les courbes concernant les blocs ayant subi l'exposition cyclique sont présentées respectivement aux figures D.20 à D.22. Il est constaté qu'il n'y a pas de différences particulières à la suite à cette exposition cyclique.

Le bloc B150-Sika-1 n'était pas instrumenté parce que l'extrémité libre de la lamelle était fendue en deux et le comportement potentiel des jauges était jugé incertain. Notons cependant que la charge d'arrachement atteinte avec ce bloc est concordante avec celles des autres blocs similaires.

7.3.4 Profil des déformations

La distribution des déformations à différentes charges pour l'ensemble de ces blocs est présentée aux figures 7.11, D.23, D.24 et D.25. Sur ces courbes, l'apparition de la fissuration au niveau du joint provoque un changement brusque de la déformation. Avant la fissuration, la déformation subit une diminution exponentielle, tel que prévu théoriquement. Avec ce matériau, il est constaté que la rupture survient peu de temps après cette fissuration.

7.3.5 Évolution de la contrainte d'adhérence

Les figures 7.12, D.26, D.27 et D.28 indiquent l'évolution de la contrainte d'adhérence le long du joint en fonction du niveau relatif du chargement F/F_{\max} . Il est remarqué avec les blocs de référence que la contribution des régions 50-125 mm et 125-225 mm est très limitée puisque la rupture survient rapidement après l'atteinte de la contrainte maximale. Or, avec l'augmentation des cycles de gel-dégel, il est observé que la contribution de ces deux régions est plus importante. De plus, les contraintes d'adhérence calculées sont relativement plus élevées pour les blocs ayant subi les cycles de gel-dégel. Somme toute, cette augmentation de la valeur de la contrainte est conséquente avec l'augmentation générale de la charge ultime.

7.4 Conclusions sur les effets des cycles de gel-dégel

Cette étude effectuée sur le produit Carbodur S a permis de vérifier les propriétés de l'interface après une imposition de cycles de gel-dégel. D'après la réalisation d'essais de flexion sur des poutres et d'essais d'arrachement sur des blocs, les conclusions observées sont identiques. Il y a

une augmentation de la charge ultime après l'imposition des cycles de gel-dégel. Ce qui peut expliquer cette augmentation est sans doute relié à un phénomène de mûrissement du mortier adhésif. De plus, il est possible que l'amélioration des propriétés du béton puissent contribuer à cette augmentation. Quelle que soit la méthode d'essai utilisée, les résultats pour une même série d'essai sont très stables.

Pour la lamelle Carbodur S utilisée comme renforcement externe, l'intégrité de ses propriétés et de son interface a été observée en dépit de l'exposition accélérée aux cycles de gel-dégel.

Tableau 7.1 - Sommaire des résultats des essais de flexion pour les cycles de gel-dégel

Description	Nombre de cycles	Charge de fissuration (kN)	Charge ultime (kN)	Déformation max. dans le PRF ($\mu\epsilon$)	Flèche au centre à la charge ultime (mm)
Carbodur S					
P0-Sika-1	0	12,0	48,5	3286	4,6
P0-Sika-2		12,9	56,8	3820	5,0
P50-Sika-1	50	12,0	54,0	3842	4,6
P50-Sika-2		nd	54,1	3689	4,4
P150-Sika-1	150	12,5	57,0	4050	5,2
P150-Sika-2		12,3	58,8	4073	5,4
P300-Sika-1	300	12,0	65,4	5100	6,8
P300-Sika-2		12,6	64,3	4968	6,8
P300-Sika-3		12,8	59,3	4290	5,5

Tableau 7.2 - Sommaire des résultats des essais d'arrachement pour les cycles de gel-dégel

Description	Nombre de cycles	Charge ultime (kN)	Déformation max. dans le PRF ($\mu\epsilon$) à (jauge,mm)	
Carbodur S				
B0-Sika-1	0	35,73	3140	125
B0-Sika-2		35,44	3592	0
B0-Sika-3		30,53	1842	0
B50-Sika-1	50	49,54	4856	50
B50-Sika-2		43,07	4190	0
B50-Sika-3		45,73	4414	50
B150-Sika-1	150	49,18	nd	
B150-Sika-2		56,80	5338	0
B150-Sika-3		49,80	4486	50
B300-Sika-1	300	49,60	5332	0
B300-Sika-2		52,80	5104	50
B300-Sika-3		54,00	4790	0

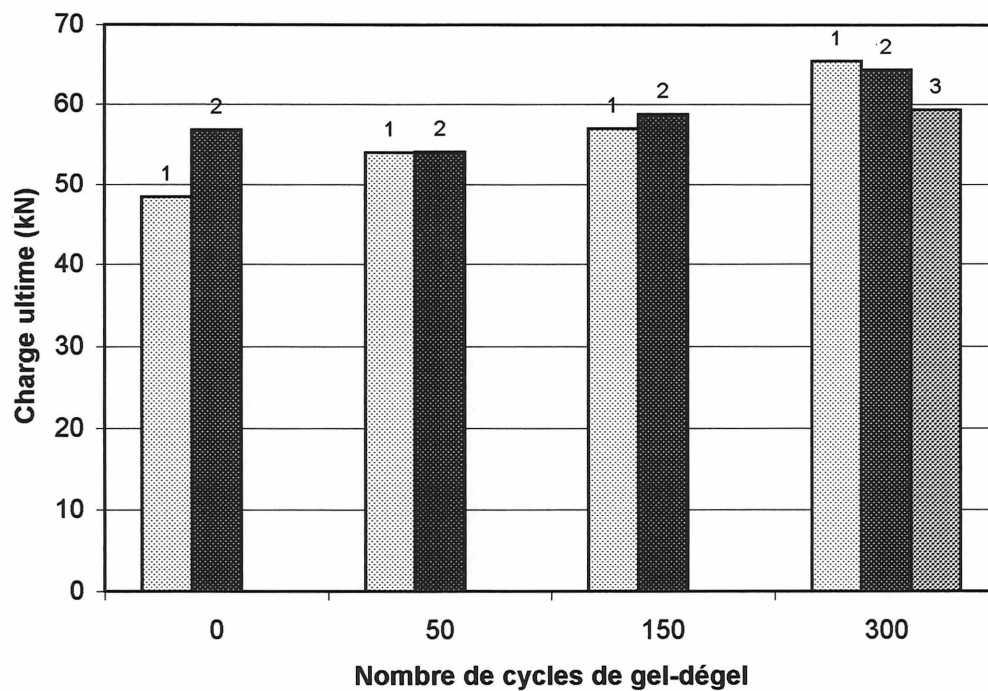


Figure 7.1 - Charge ultime des poutres avec le Carbodur S

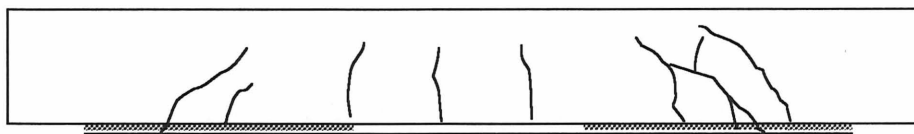


Figure 7.2 - Réseau de fissuration d'une poutre typique renforcée de Carbodur S

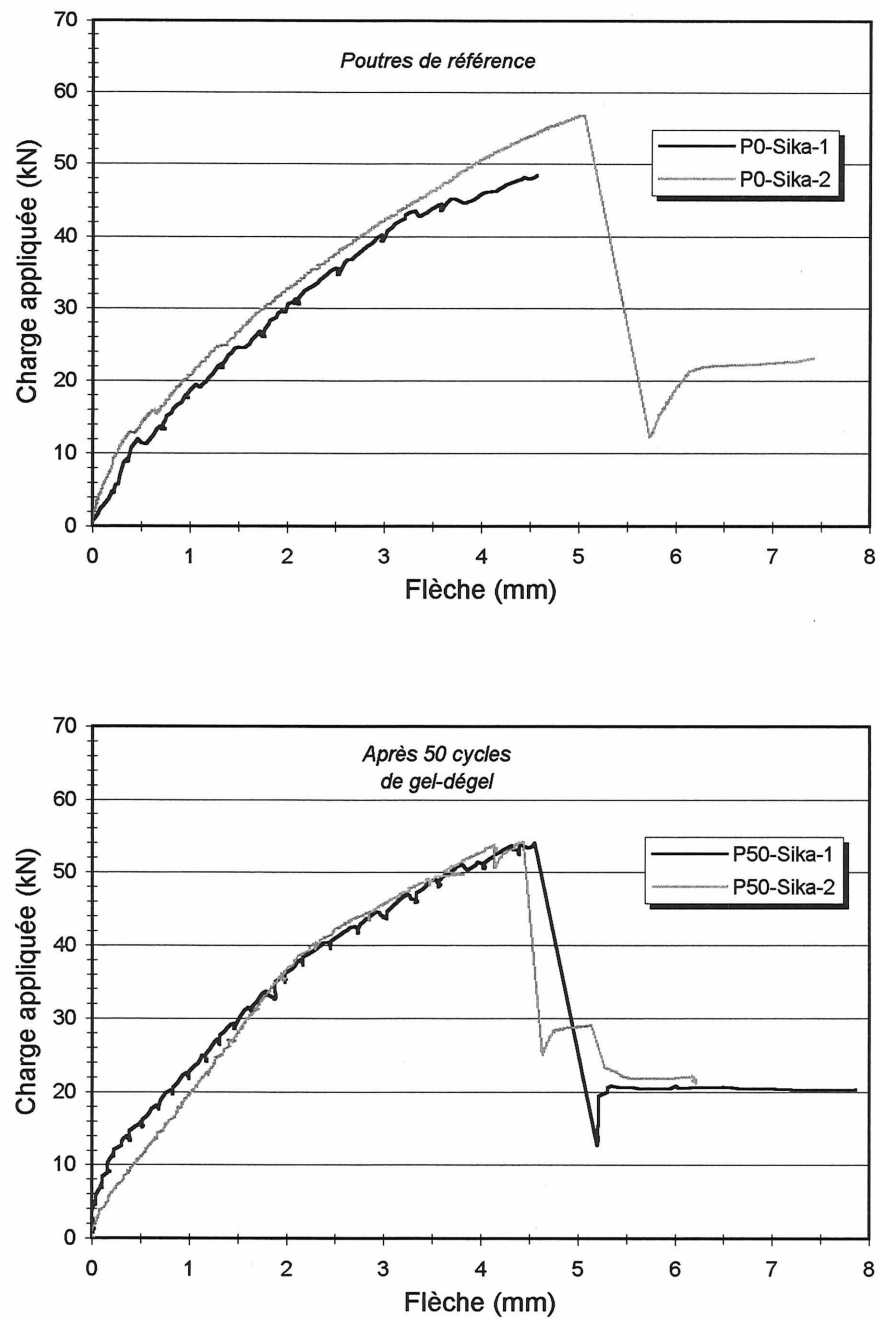


Figure 7.3 - Courbes charge-flèche des poutres renforcées de Carbodur S (0 et 50 cycles)

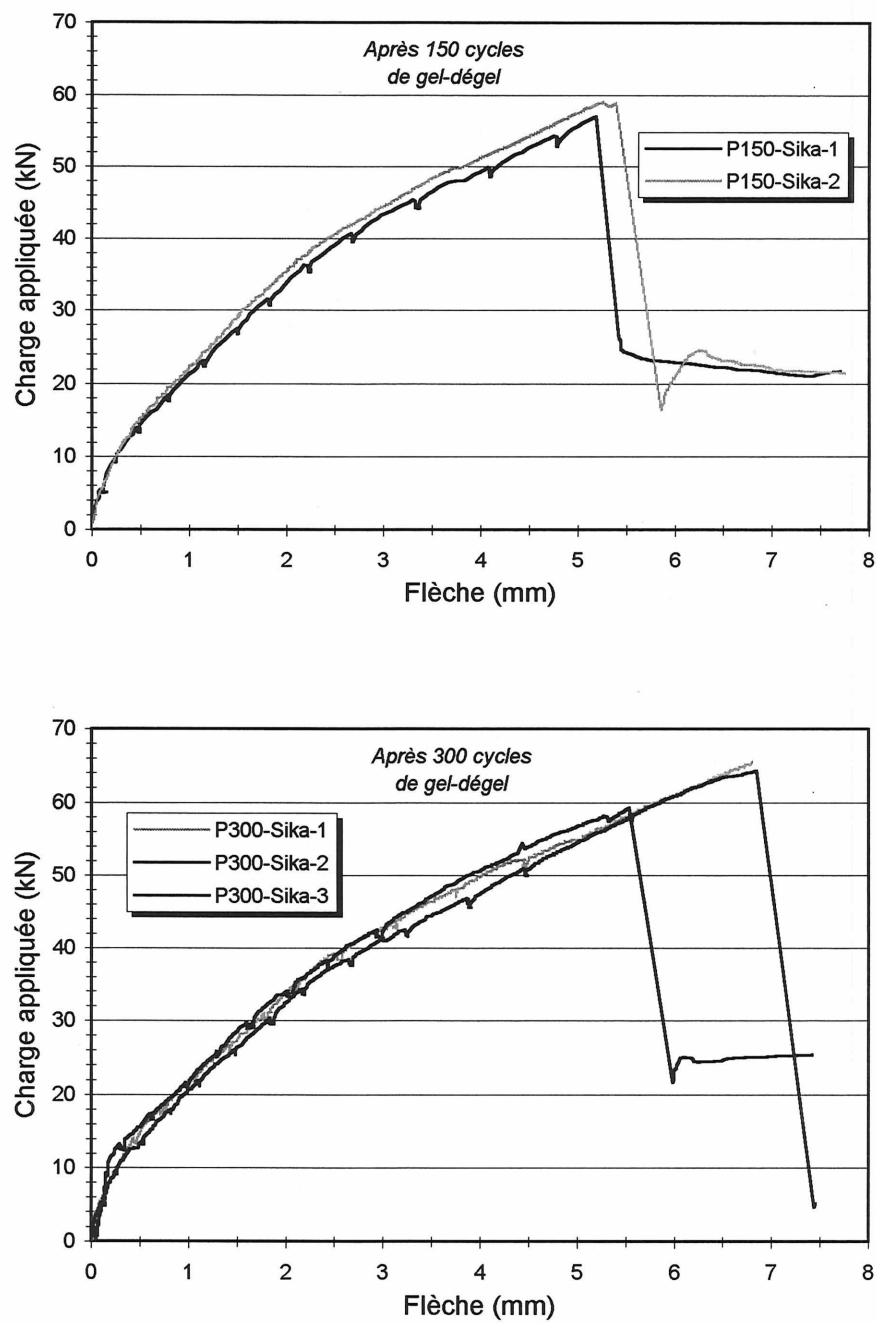


Figure 7.4 - Courbes charge-flèche des poutres renforcées de Carbodur S (150 et 300 cycles)

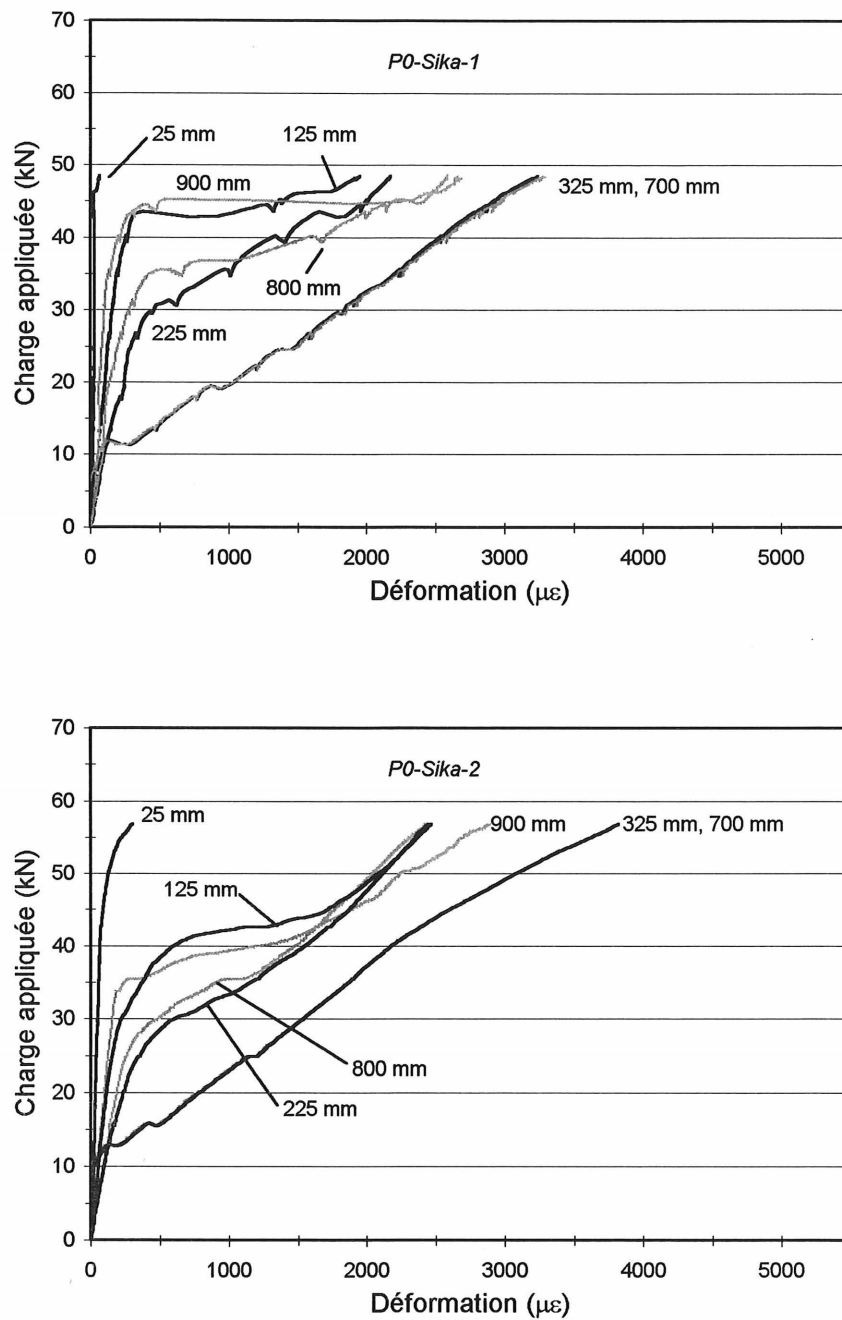


Figure 7.5 - Charge appliquée et déformations du Carbodur S pour les poutres de contrôle

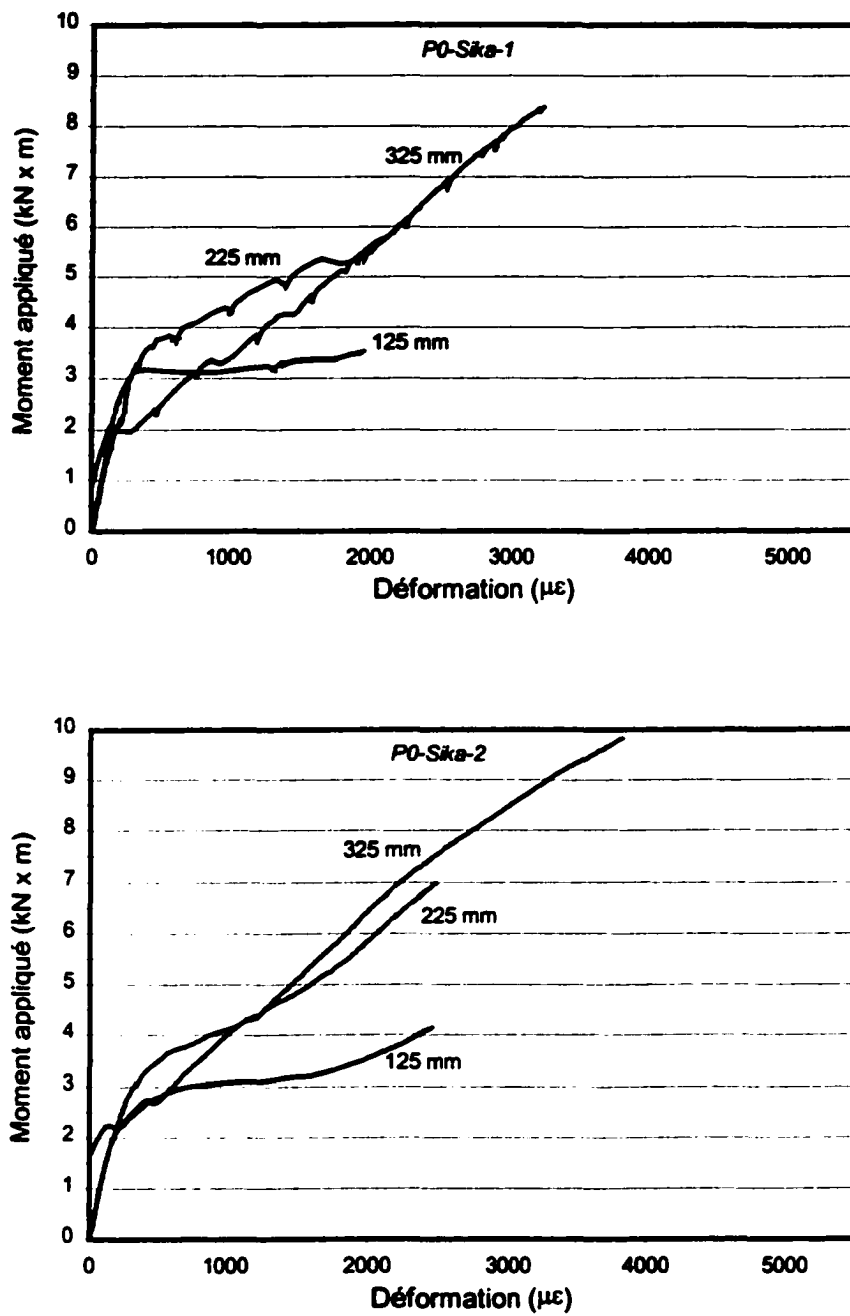


Figure 7.6 - Moment appliqué et déformations du Carbodur S pour les poutres de contrôle

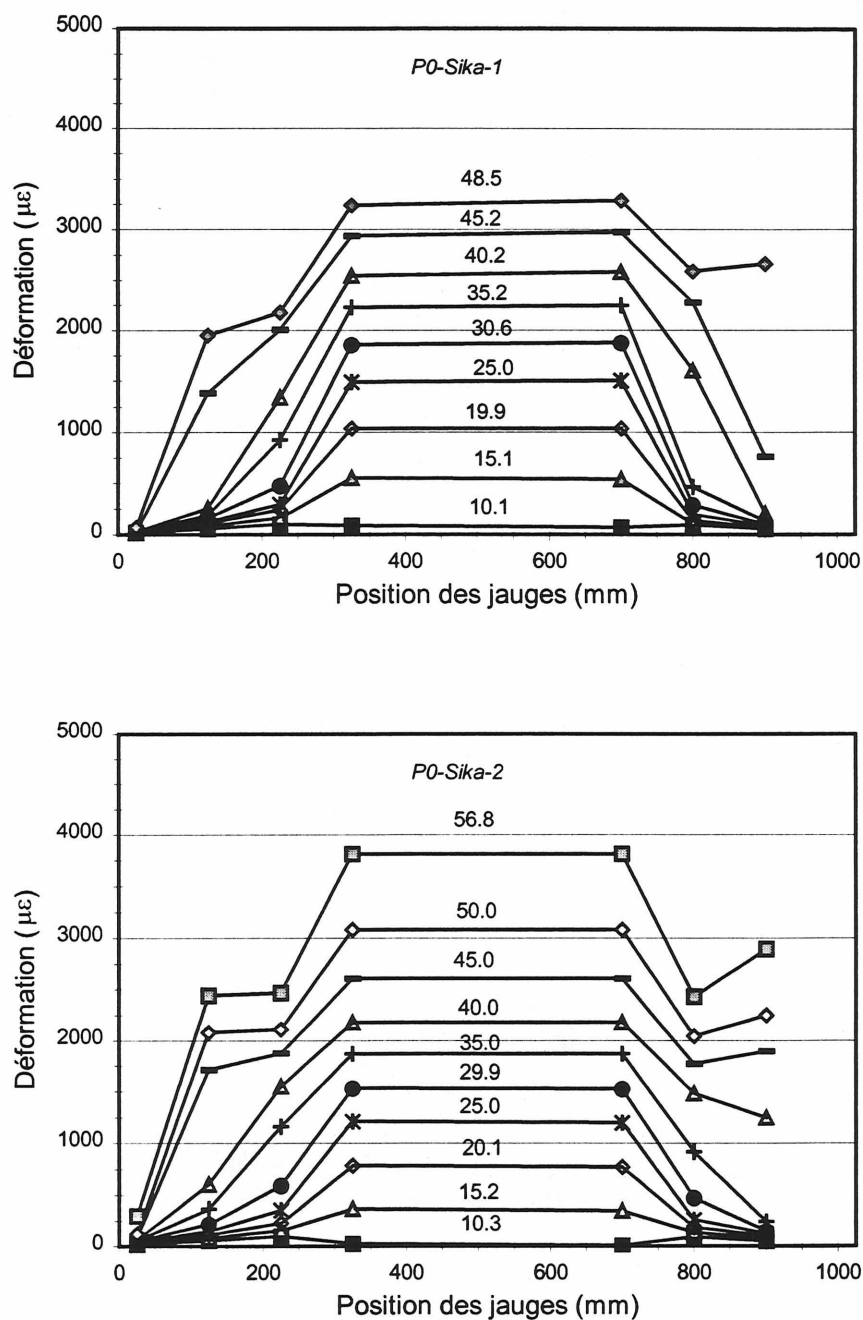


Figure 7.7 - Profil des déformations le long du Carbodur S pour les poutres de contrôle en fonction de la charge appliquée

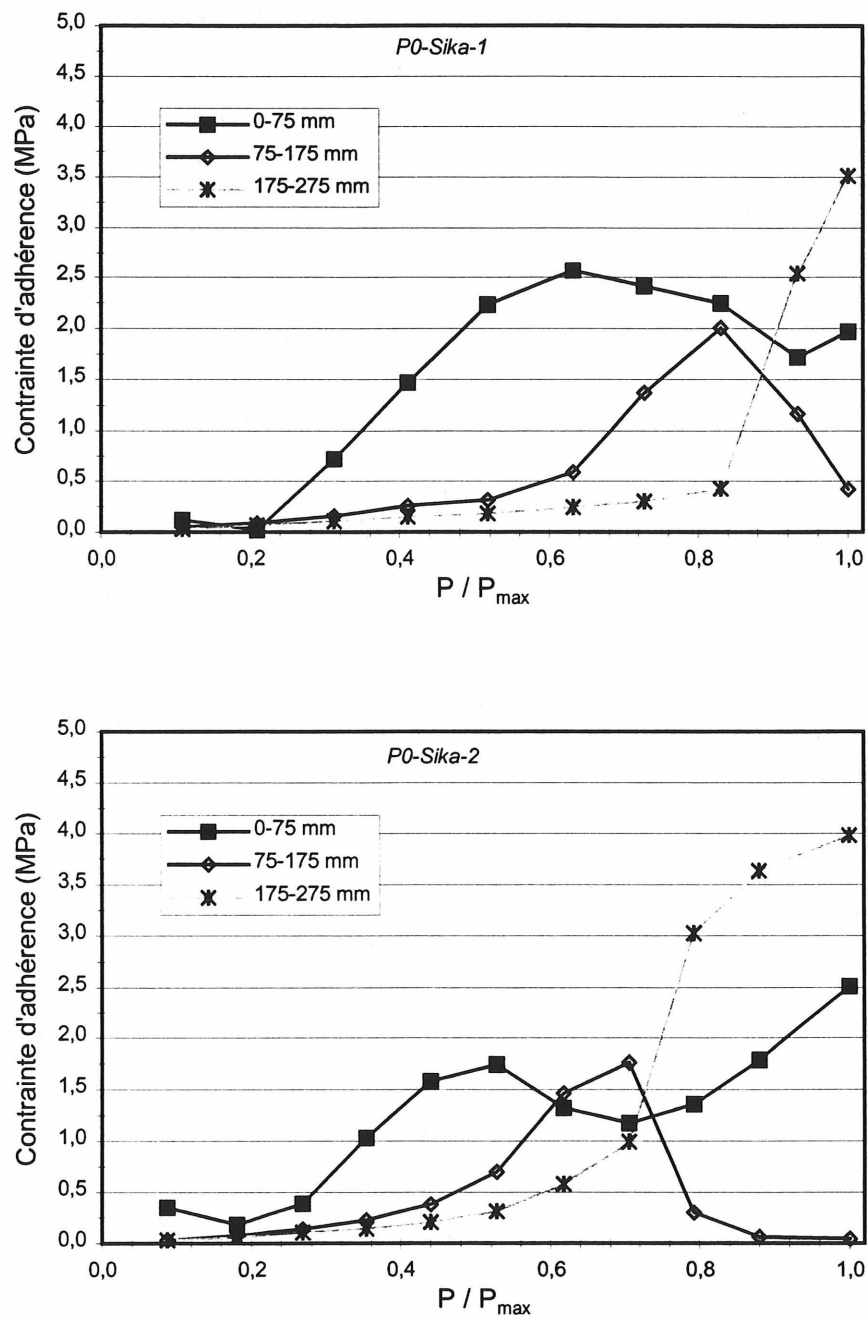


Figure 7.8 - Contrainte d'adhérence en fonction du niveau relatif du chargement des poutres de contrôle Carbodur S

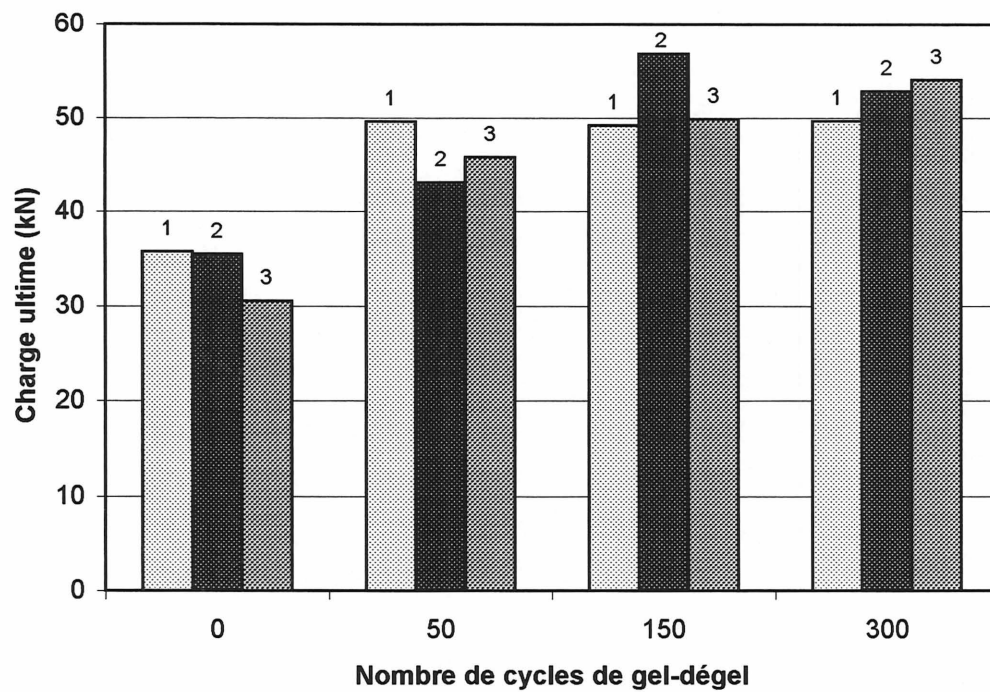


Figure 7.9 - Charge ultime des blocs avec le Carbodur S

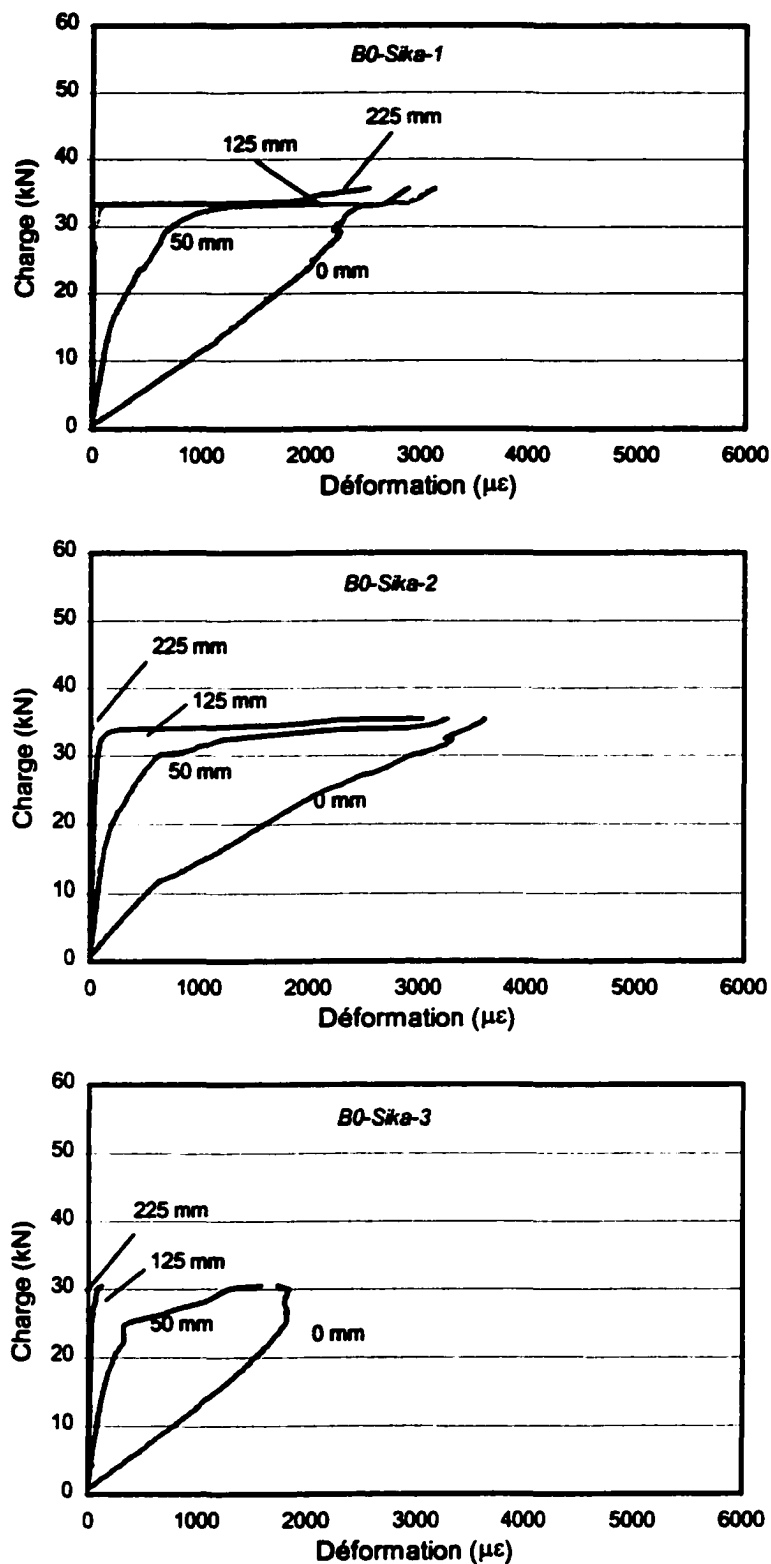


Figure 7.10 - Charge appliquée et déformations du Carbodur S pour les blocs de référence

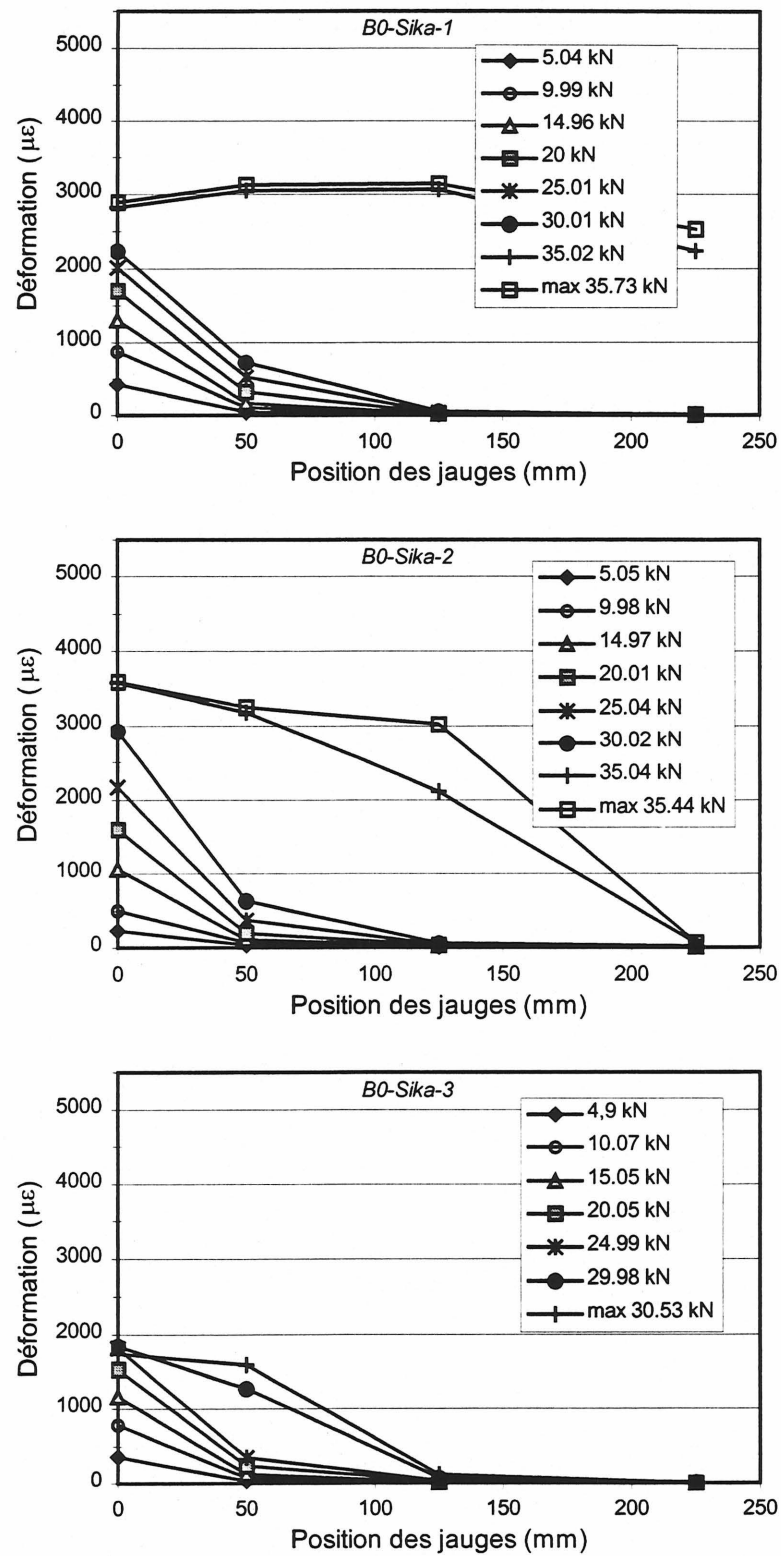


Figure 7.11 - Profil des déformations le long du Carbodur S pour les blocs de référence en fonction de la charge appliquée

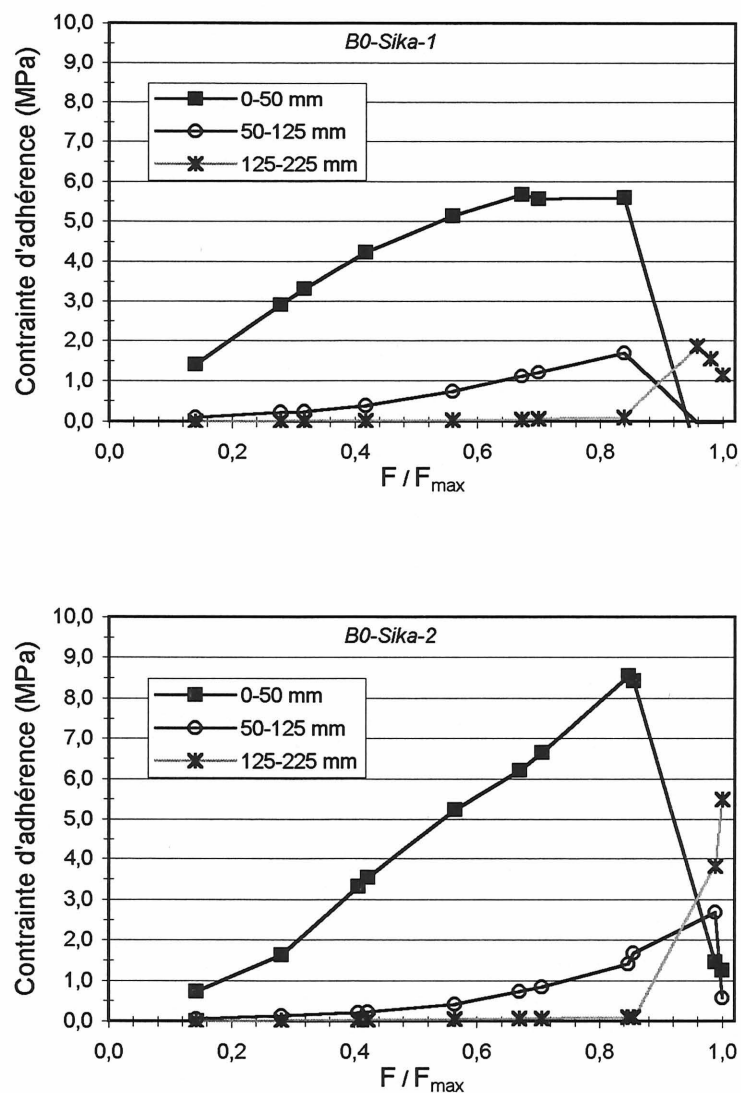


Figure 7.12 - Contrainte d'adhérence en fonction du niveau relatif du chargement des blocs de référence Carbodur S

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail présenté était une nouvelle orientation de recherche expérimentale, à l'Université de Sherbrooke, pour étudier la durabilité des réparations de structures en béton avec des matériaux composites. Ce travail a regroupé les résultats de deux études expérimentales, l'une présentant les effets de la température et du gel-dégel sur les propriétés élastiques des matériaux composites et l'autre vérifiant l'effet des cycles de mouillage-séchage et du gel-dégel sur le renforcement externe et l'interface composite-béton.

Dans le cadre de la première étude présentée aux chapitres 3 et 4, nous avons effectué des essais de traction sur des échantillons de composites unidirectionnels de carbone/époxy et de verre-E/époxy. Une analyse statistique des résultats a été effectuée et elle a permis de conclure que la température et le gel-dégel n'ont aucun effet significatif sur les propriétés élastiques étudiées, à l'exception de la température de 60 °C. Pour cette dernière, on a noté des baisses substantielles de la contrainte ultime et du module élastique. Avec les deux produits testés, il semble que la modification des propriétés de la résine époxy a provoqué cet effet. À cet égard, la température de transition vitreuse (T_g) pourrait être en cause dans le changement observé. Une attention particulière devrait donc être portée à la protection des composites pour des températures plus élevées que 38 °C.

L'étude que nous avons présentée dans les chapitres 5 à 7 concerne la durabilité de deux produits de renforcement externe à base de fibres de carbone et la vérification de l'interface composite-béton. Des cycles de mouillage-séchage et de gel-dégel de longue durée ont été imposés à des poutres en béton armé de dimensions réduites et à des blocs de béton. Nous avons donc effectué deux types d'essai, à savoir un essai de flexion sur les poutres et un essai d'arrachement sur les blocs.

Après des cycles de mouillage-séchage, dont la durée d'un cycle a été choisie afin de permettre une pénétration d'eau largement supérieure à des conditions d'exposition pour des structures réelles, les conclusions suivantes se sont dégagées :

- avec le produit Replark 20, l'essai de flexion a indiqué une diminution d'environ 10 % de la capacité des poutres et tout indique que cette réduction est une conséquence des cycles de mouillage-séchage. Cependant, une augmentation de la résistance à l'arrachement de plus de 10 % a été obtenue sur les blocs. D'après l'ensemble des paramètres regardés dans l'analyse de ces deux essais, l'interface composite-béton semble conserver son intégrité.
- avec le produit Carbodur S, les deux essais indiquent une amélioration générale du comportement des échantillons testés.

Des cycles de gel-dégel ont été réalisés sur des poutres et des blocs similaires. Uniquement le produit Carbodur S a fait l'objet de ces essais. Ses propriétés n'ont pas été affectées par cette exposition, pas plus que l'adhérence avec le béton. Un phénomène de mûrissement du mortier adhésif permet peut-être une explication sur l'amélioration générale du comportement des échantillons testés.

De manière générale, les résultats de cette étude permettent de conclure en la durabilité des renforcements *in situ* de poutres de pont avec des matériaux composites. La capacité de ces matériaux à affronter les intempéries du climat canadien semble assurée pour une prolongation raisonnable de la durée de vie d'une structure existante. Des applications *in situ* permettront de confirmer les conclusions présentement avancées.

Un éventuel projet d'étude complémentaire pourrait porter sur la durabilité d'échantillons sous chargement, et soumis à un vieillissement expérimental donné. De plus, une meilleure identification du pourcentage de fibres qui se retrouve dans le composite serait souhaitable. D'autres travaux devraient être envisagés sur l'étude des résines afin d'en déterminer les propriétés intrinsèques et d'en vérifier les performances dans l'environnement des structures de génie civil.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Pour conclure, mentionnons que les études sur la durabilité et le comportement à long terme des matériaux composites utilisés pour renforcer et réhabiliter des structures doivent se poursuivre. De plus, les personnes impliquées dans le domaine ont intérêt à développer des procédures standardisées et d'harmoniser les informations relatives à la durabilité dans le but de justifier l'intégration des matériaux composites dans le contexte du génie civil. Ce travail a permis, entre autres, d'explorer quelques effets des conditions environnementales souvent rencontrées au Canada, mais il reste encore de nombreuses avenues à explorer.

Annexe A

COURBES CONTRAINTE-DÉFORMATION *NON CORRIGÉES*

A.1 Effet de la température

Cette section présente les courbes obtenues pour les essais de traction effectués à -40°C , -20°C , 4°C , 21°C , 38°C et 60°C .

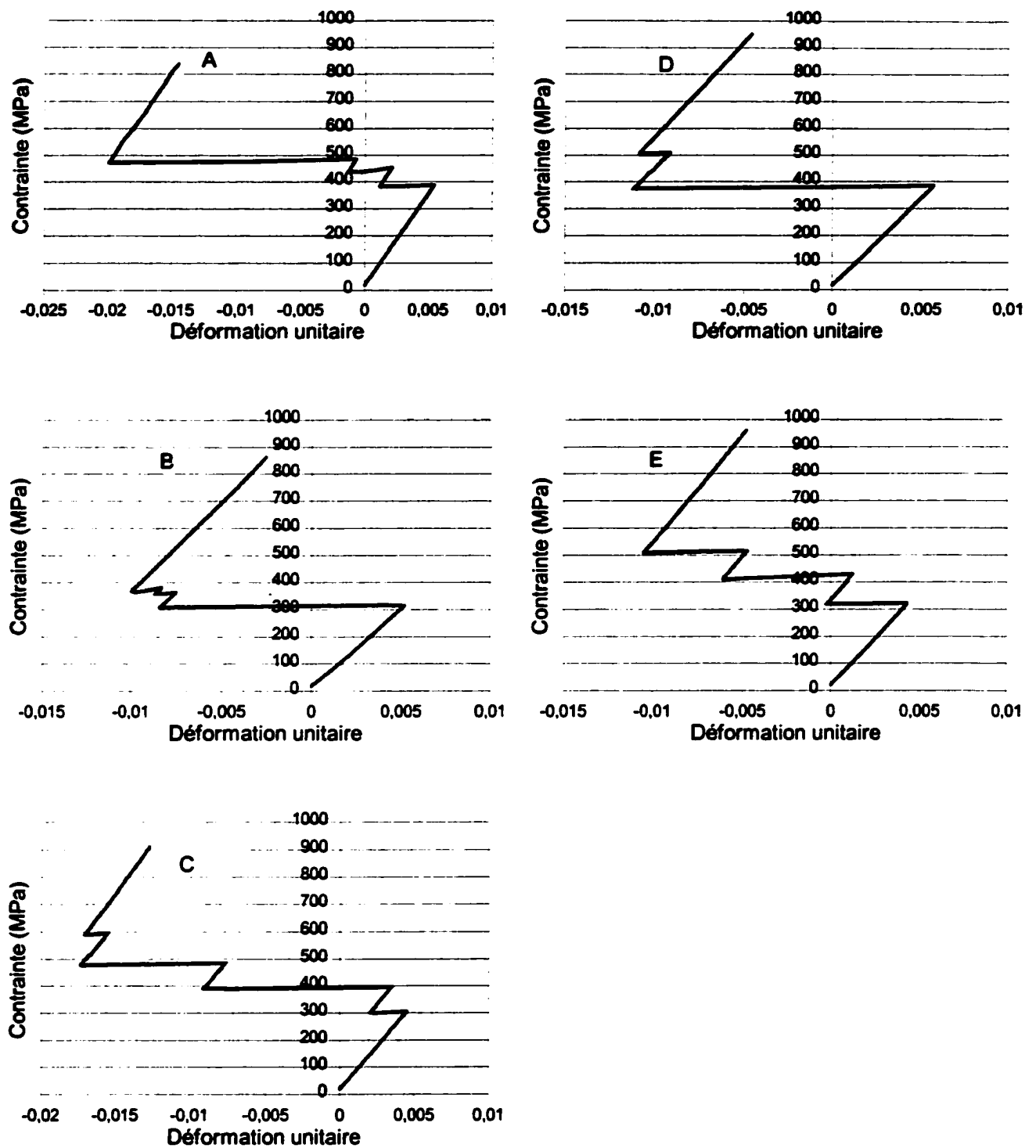


Figure A.1 - Courbes expérimentales du carbone/époxy à une température de -40°C

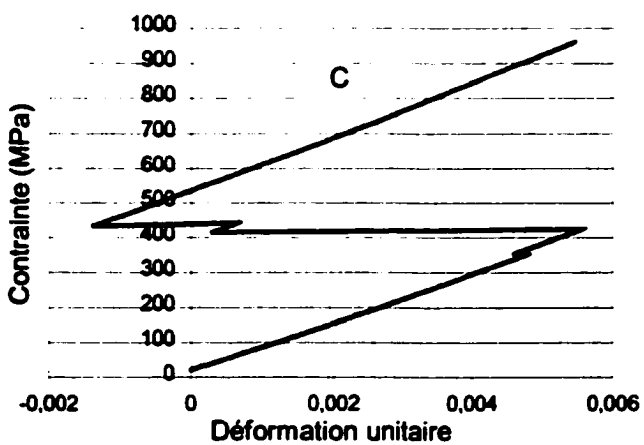
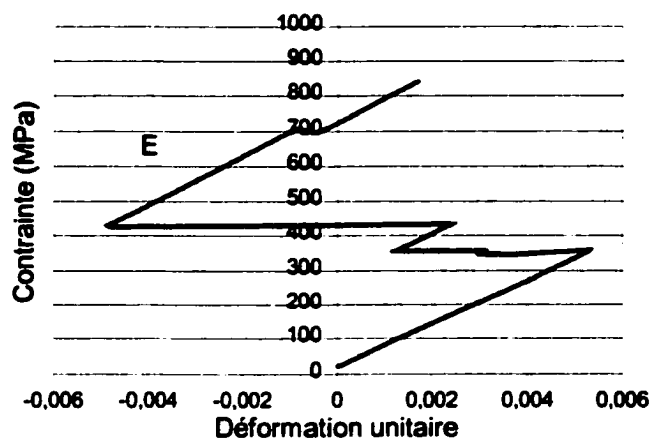
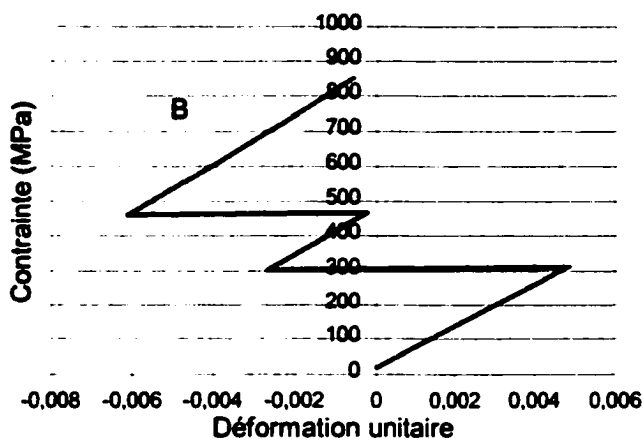
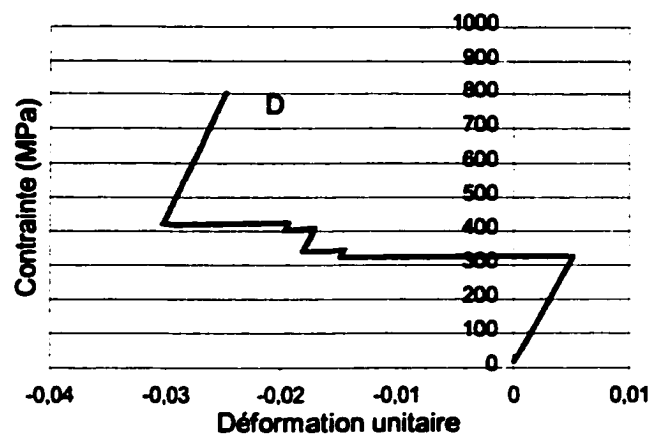
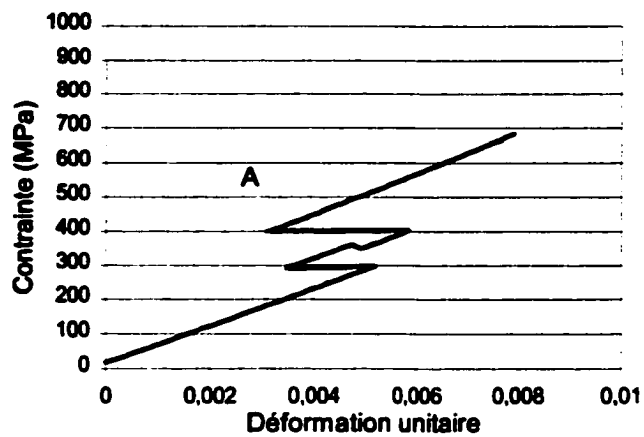


Figure A.2 - Courbes expérimentales du carbone/époxy à une température de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

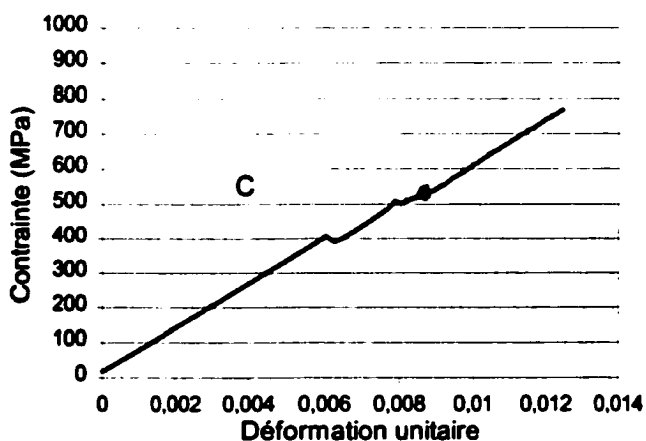
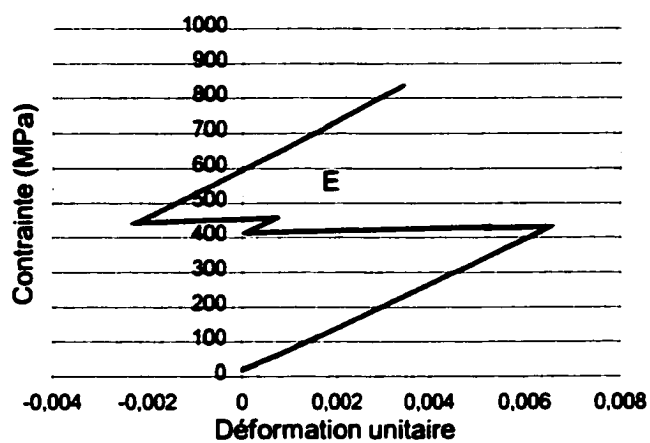
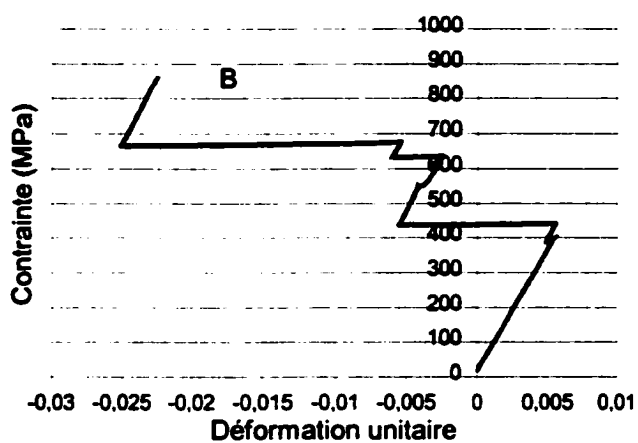
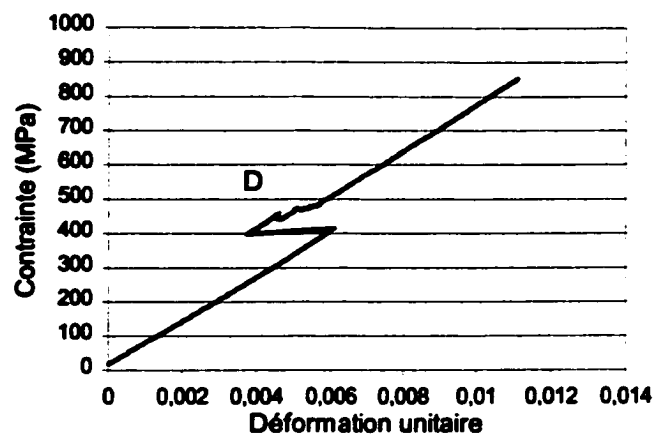
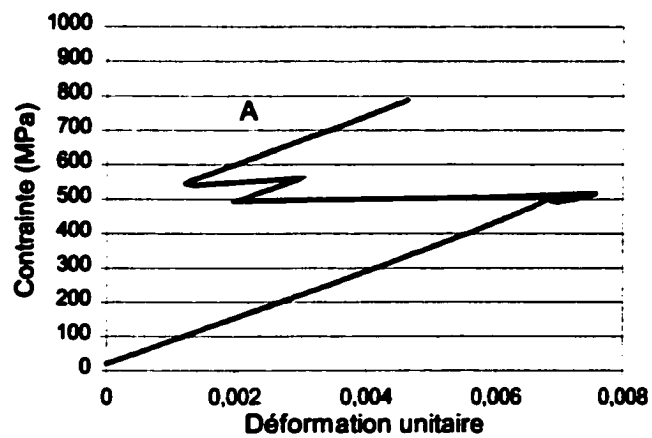


Figure A.3 - Courbes expérimentales du carbone/époxy à une température de 4 °C

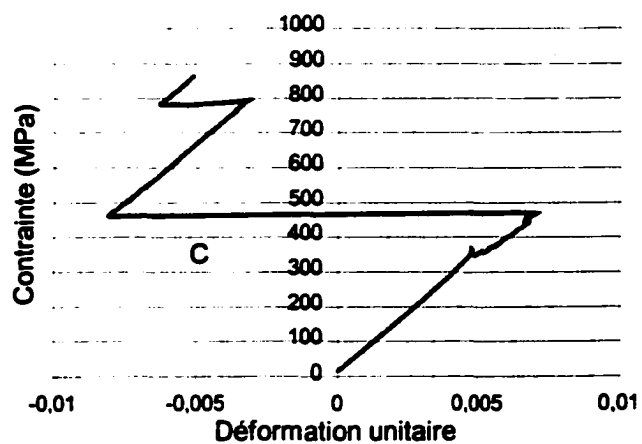
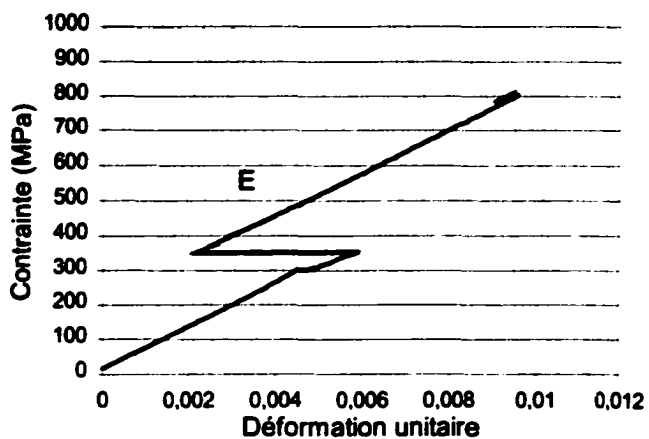
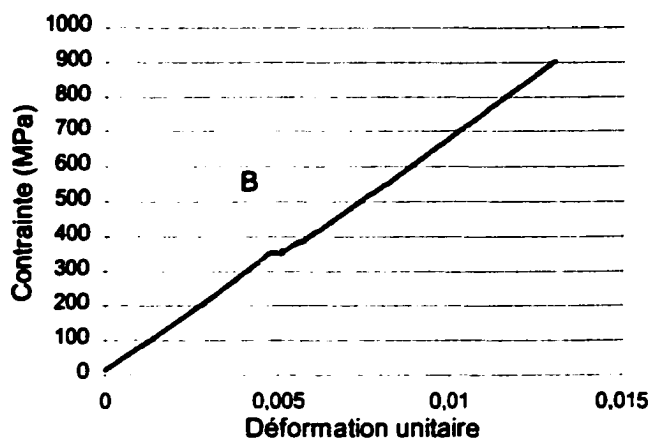
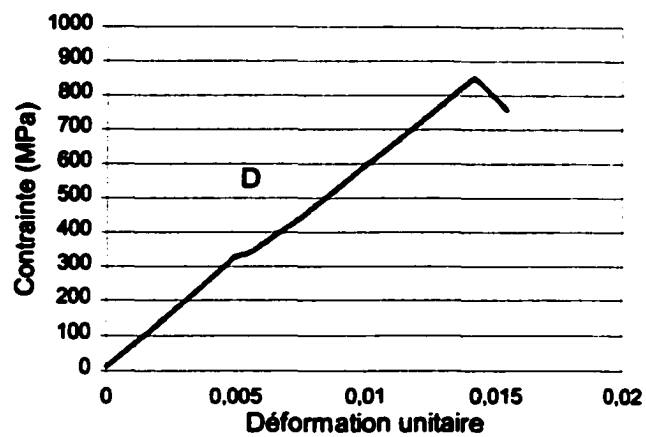
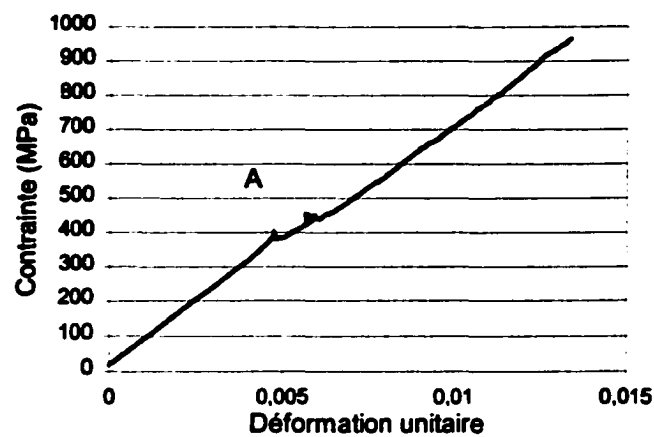


Figure A.4 - Courbes expérimentales du carbone/époxy à une température de 21 °C

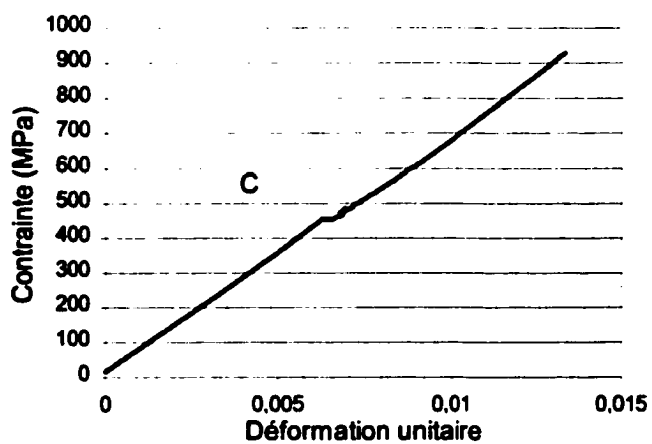
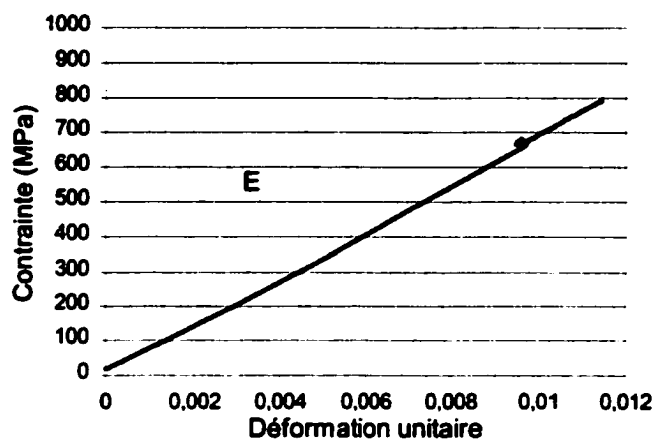
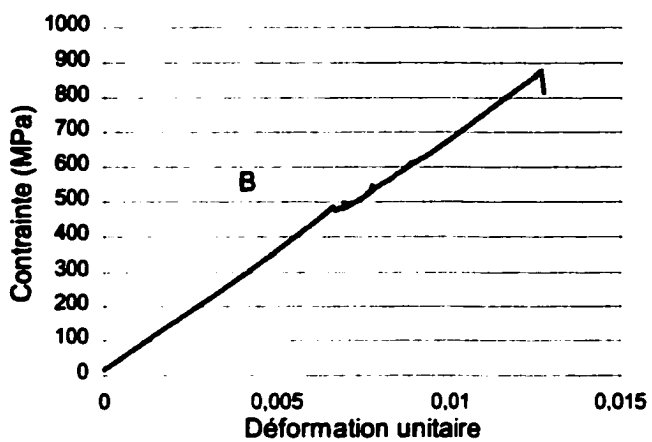
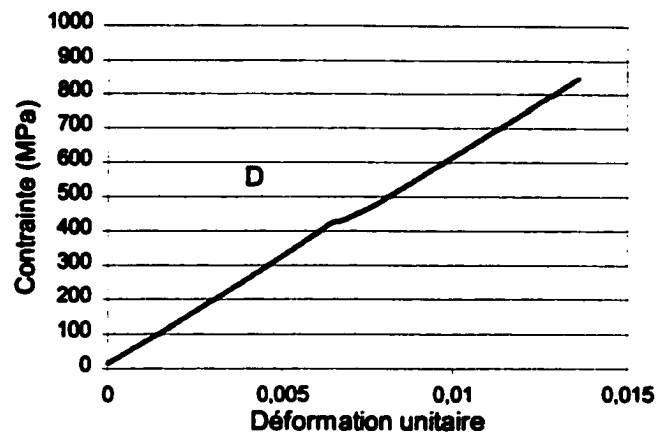
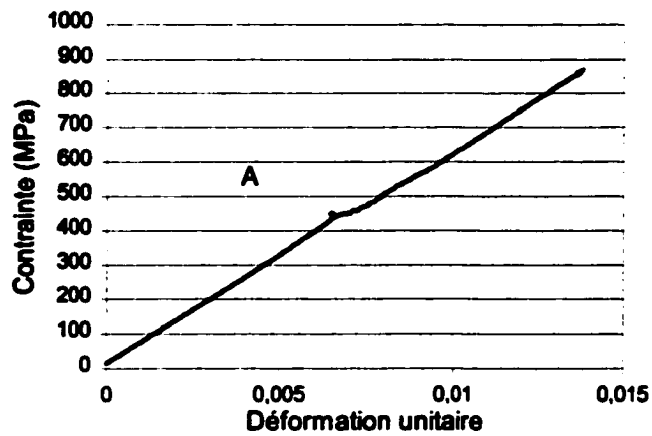


Figure A.5 - Courbes expérimentales du carbone/époxy à une température de 38 °C

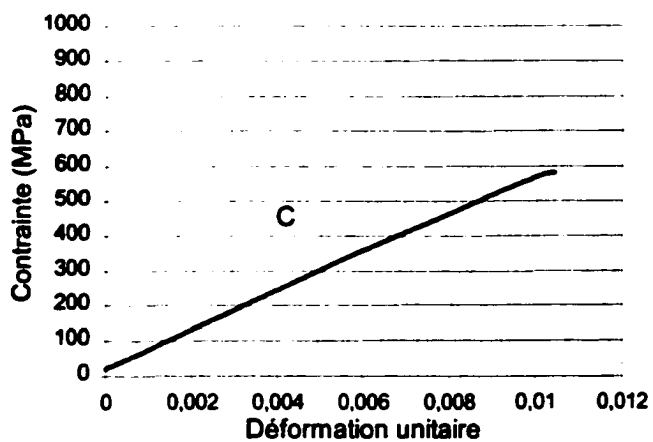
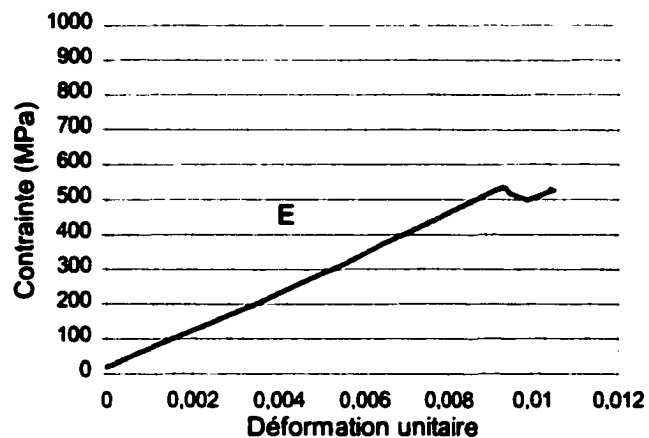
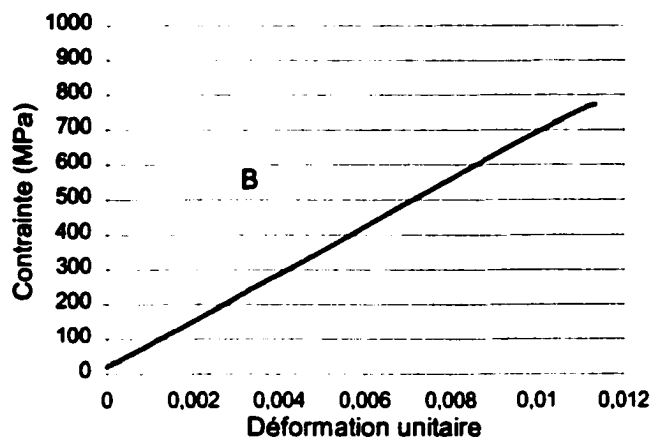
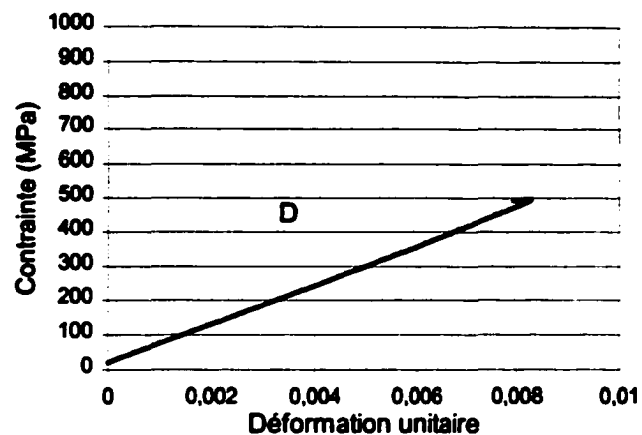
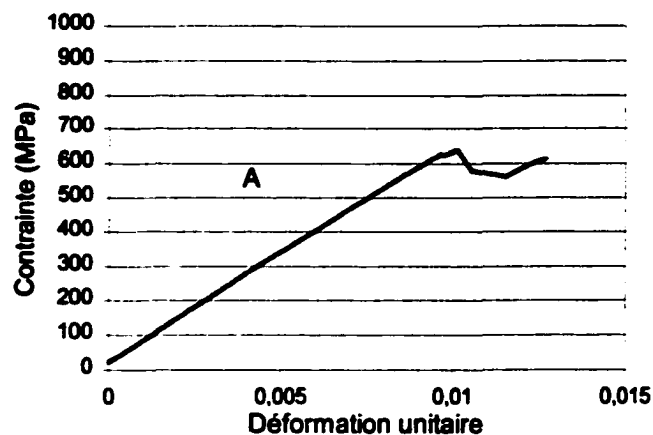


Figure A.6 - Courbes expérimentales du carbone/époxy à une température de 60 °C

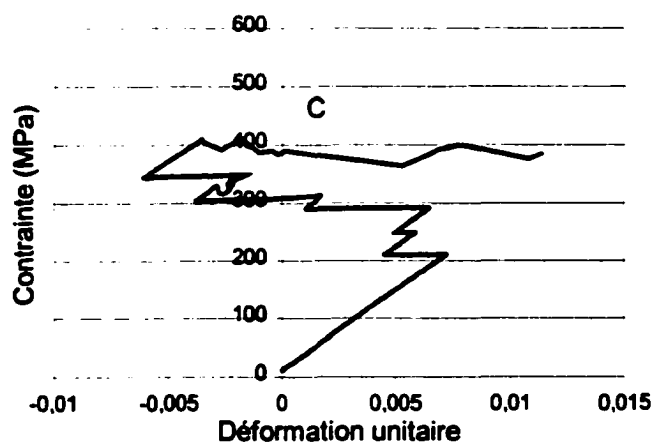
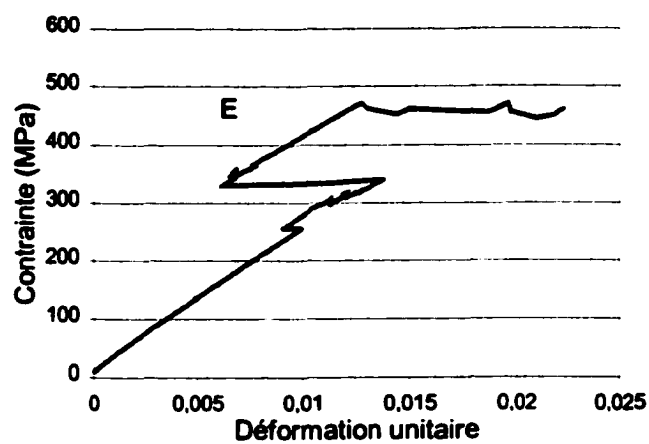
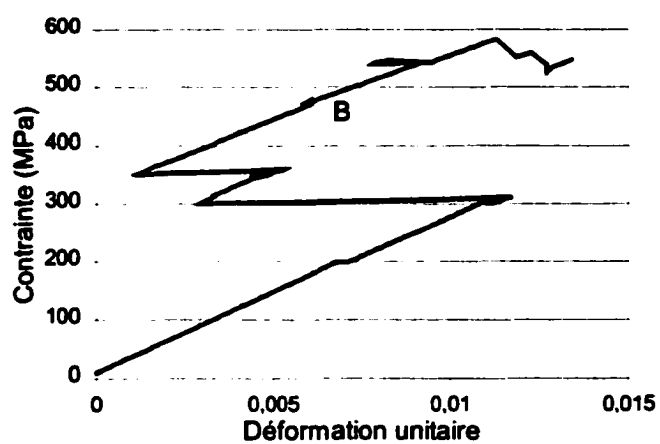
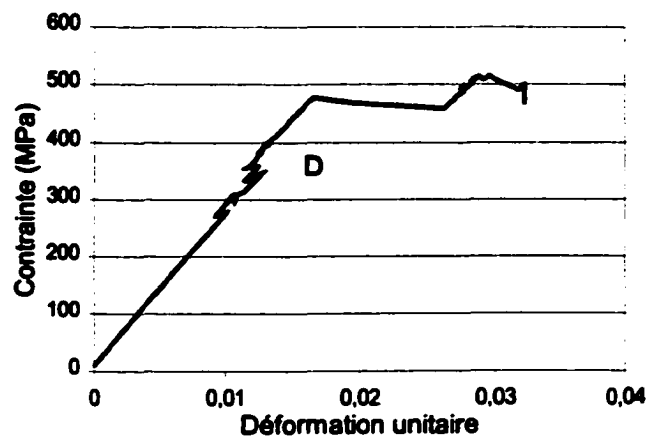
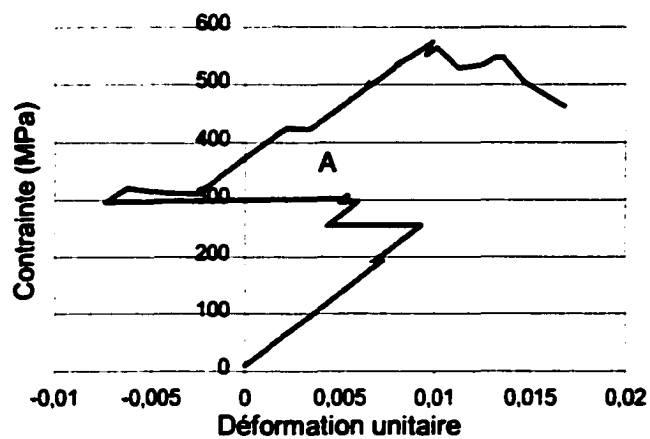


Figure A.7 - Courbes expérimentales du verre-E/époxy à une température de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

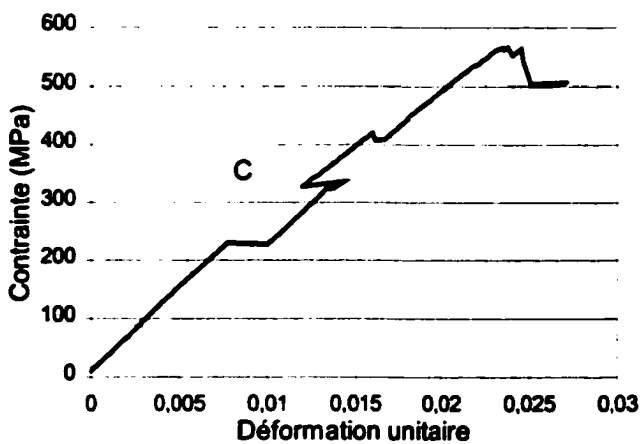
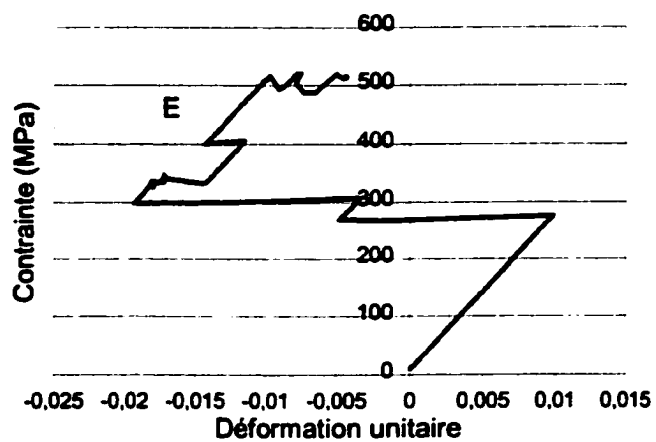
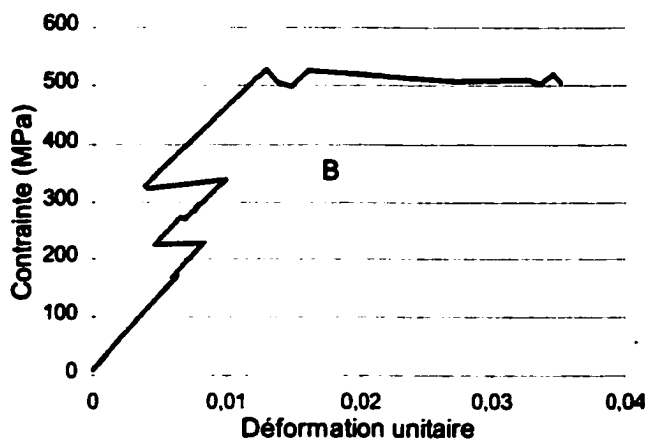
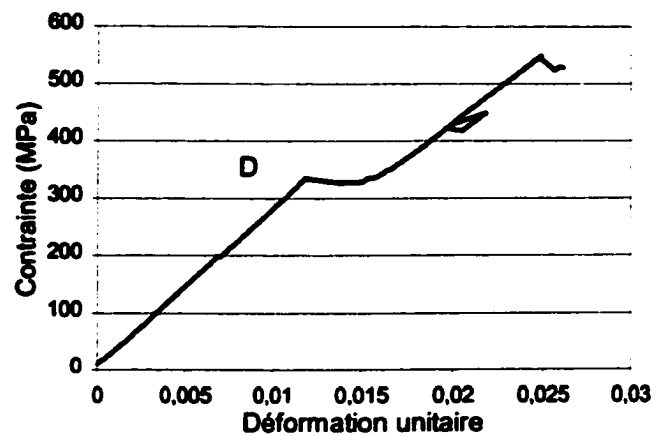
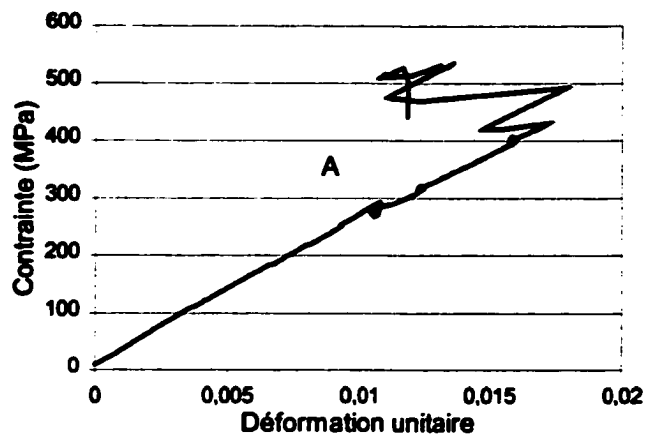


Figure A.8 - Courbes expérimentales du verre-E/époxy à une température de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

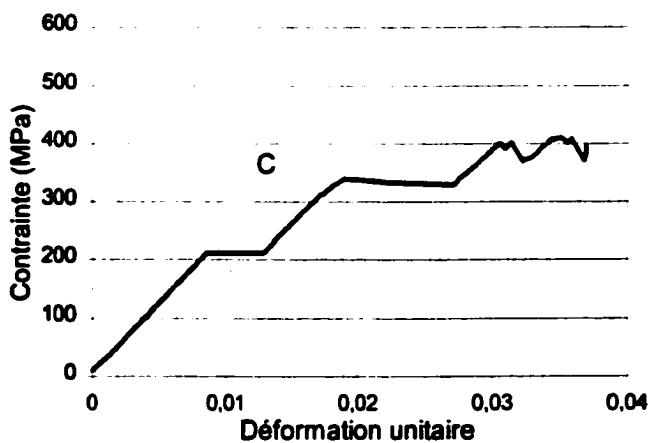
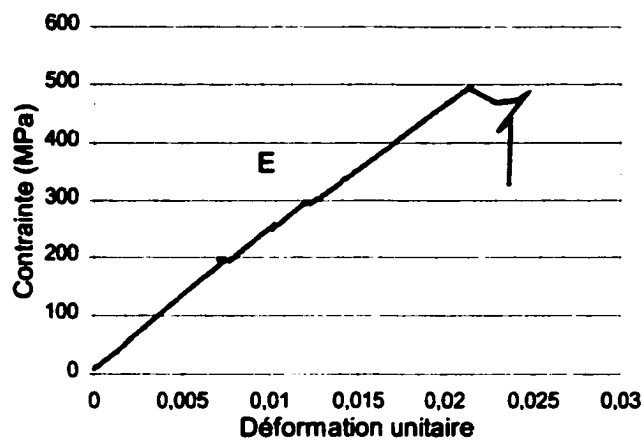
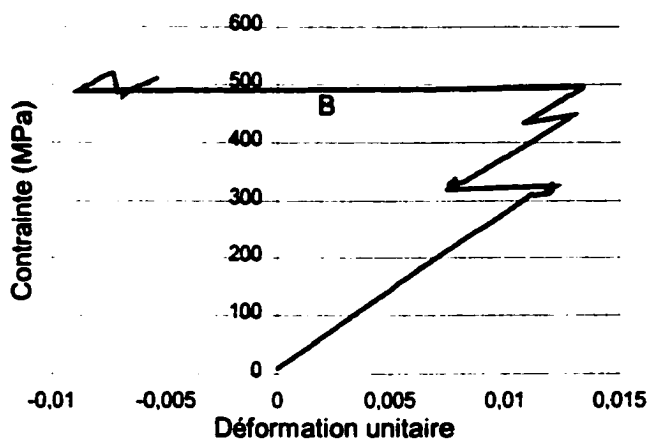
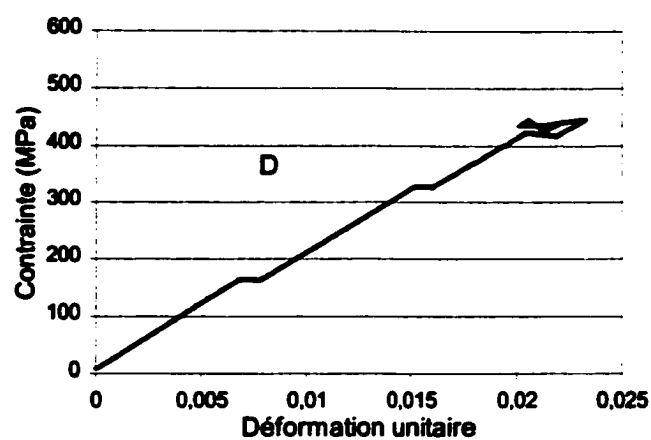
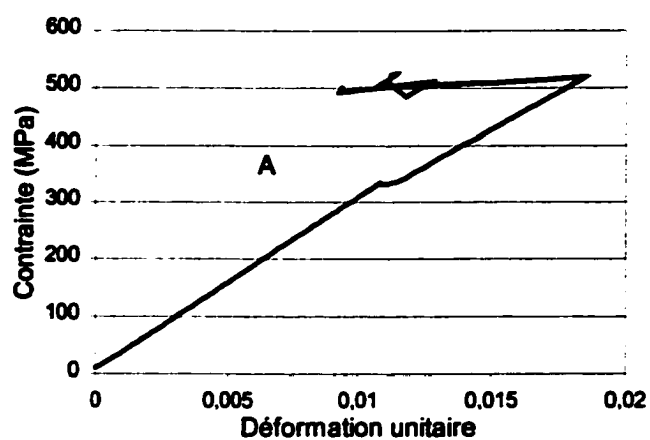


Figure A.9 - Courbes expérimentales du verre-E/époxy à une température de 4 °C

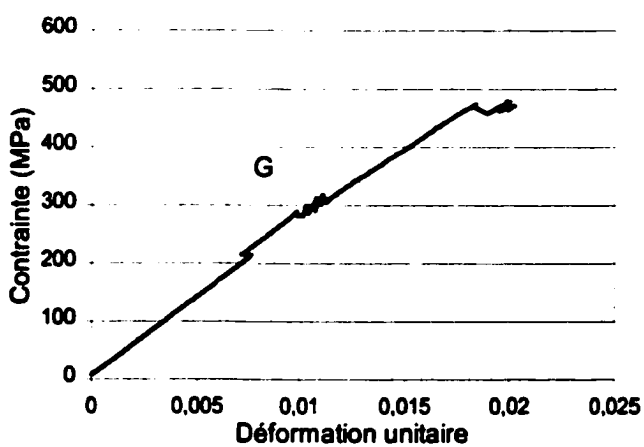
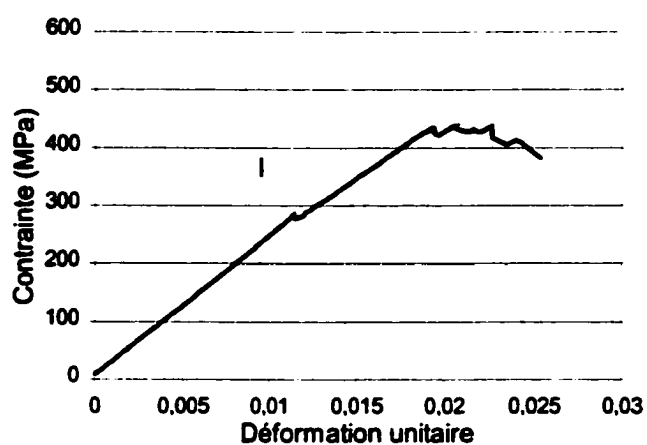
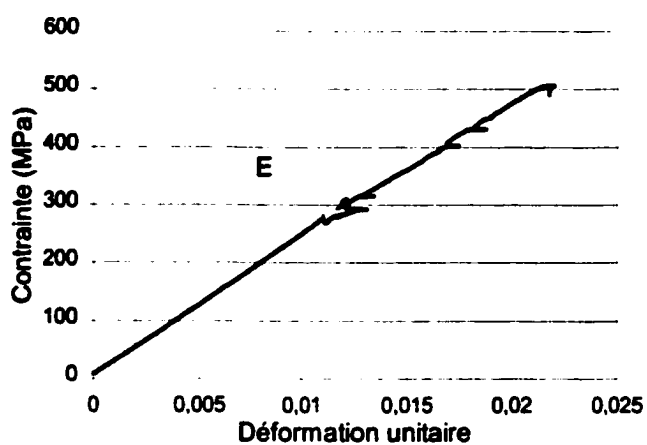
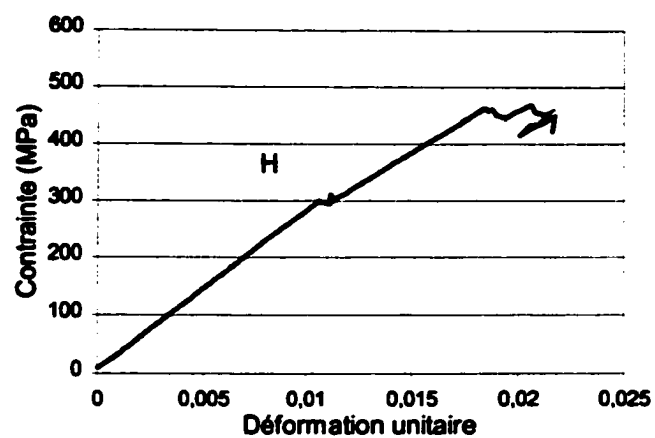
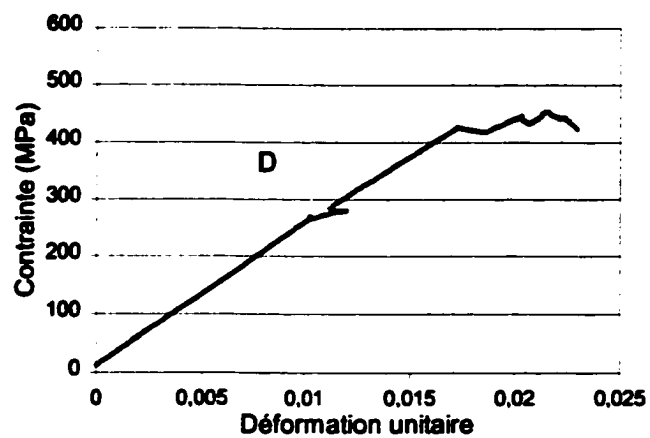


Figure A.10 - Courbes expérimentales du verre-E/époxy à une température de 21 °C

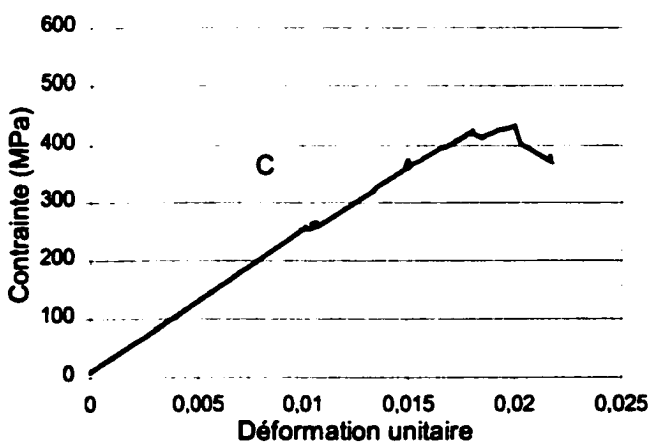
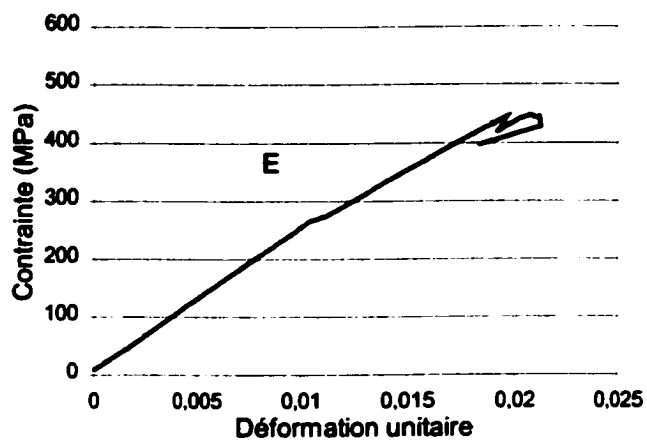
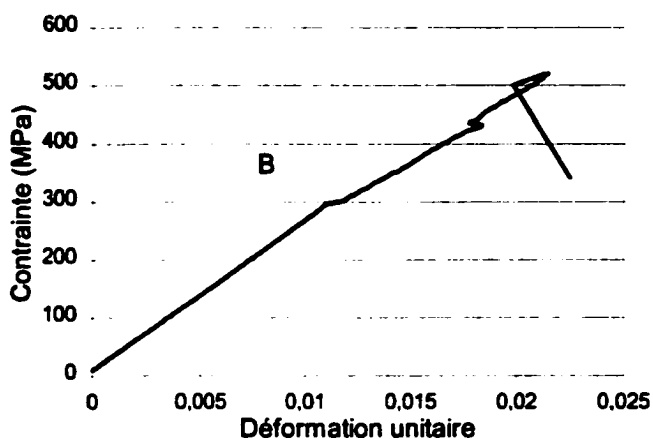
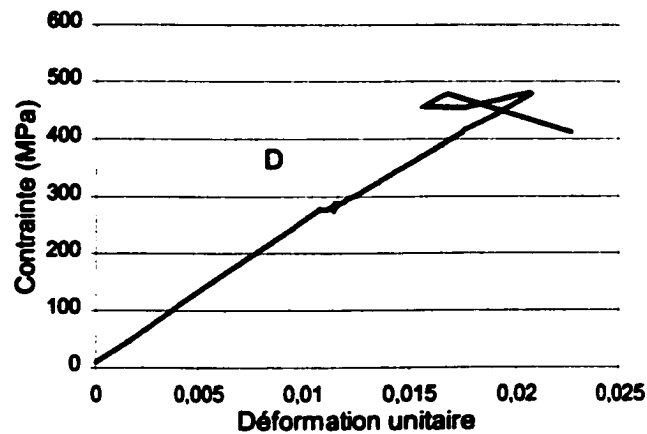
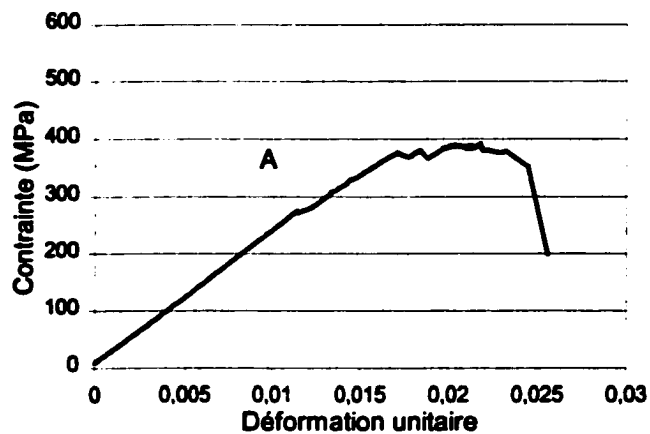


Figure A.11 - Courbes expérimentales du verre-E/époxy à une température de 38 °C

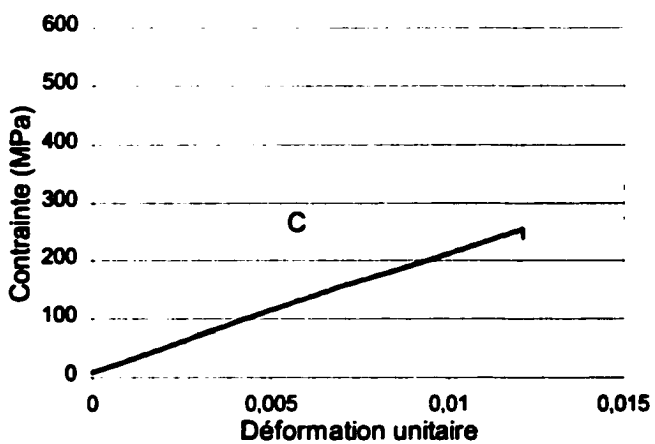
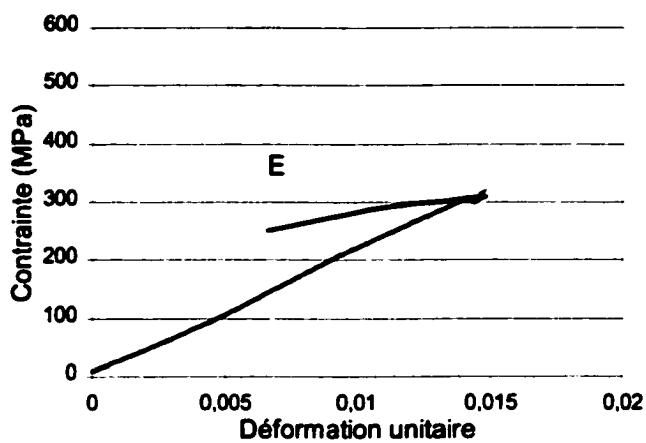
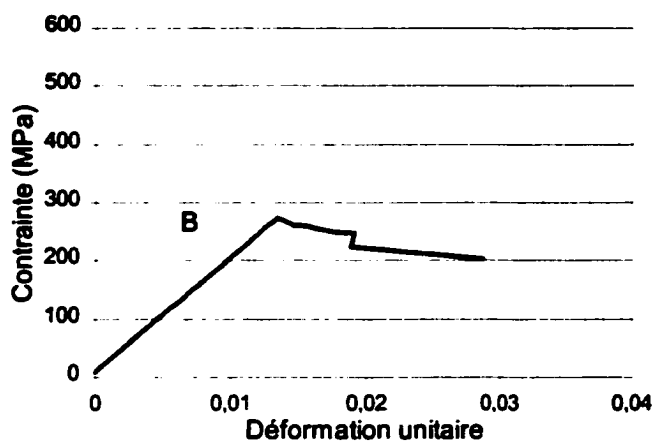
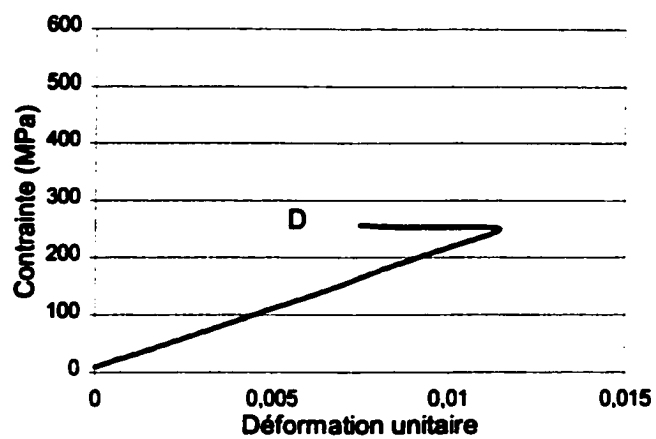
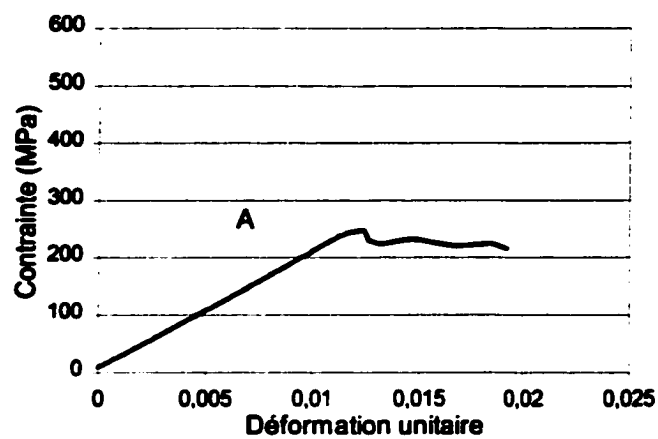


Figure A.12 - Courbes expérimentales du verre-E/époxy à une température de 60 °C

A.2 Effet des cycles de gel-dégel

Cette section présente les courbes obtenues pour les essais de traction effectués après 0, 300, 600 et 900 cycles de gel-dégel.

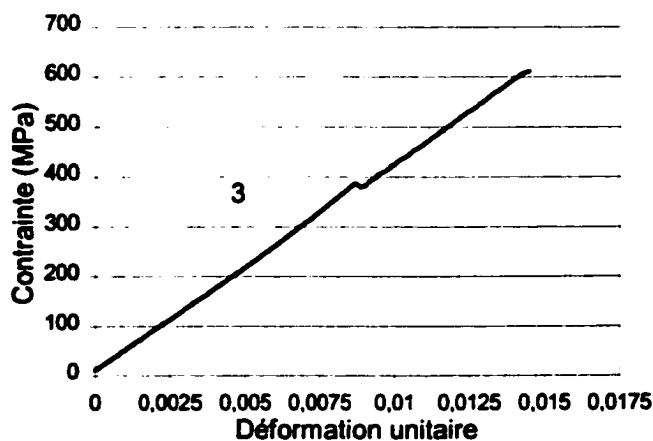
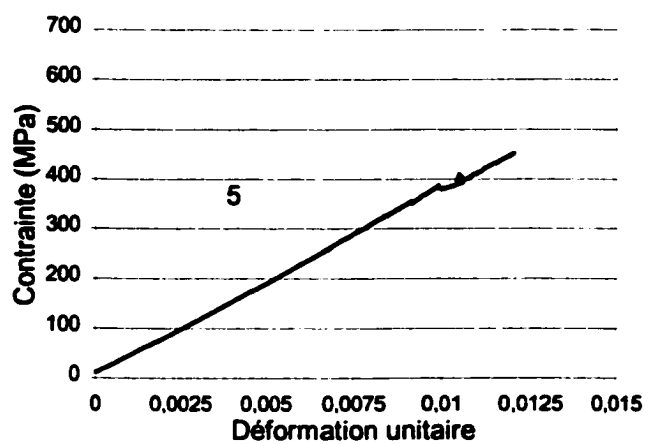
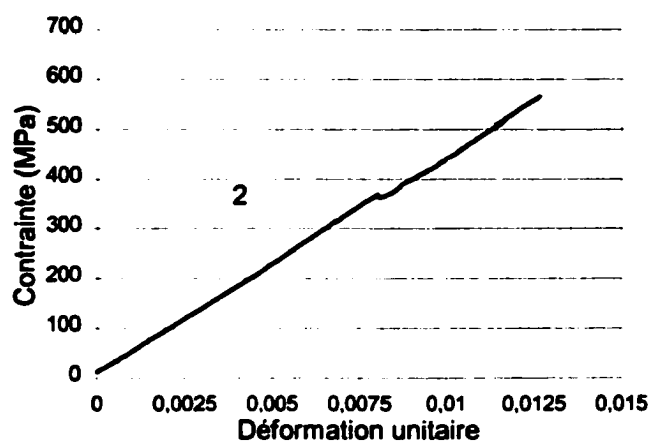
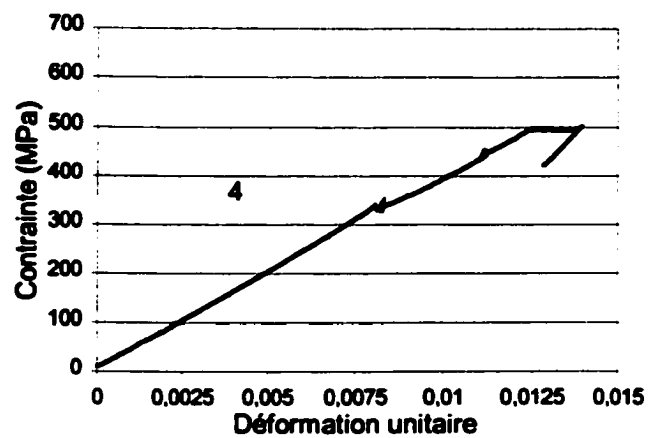
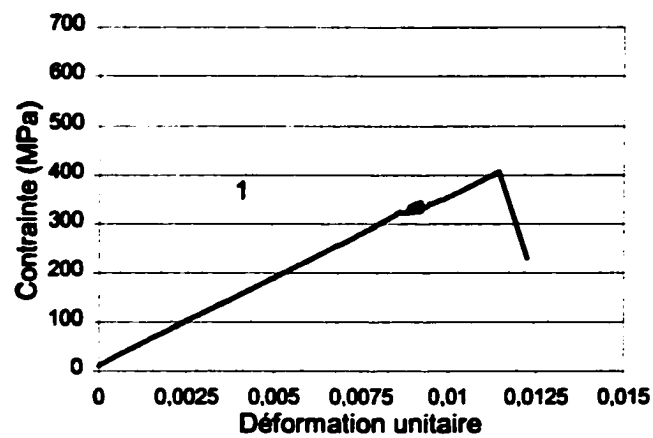


Figure A.13 - Courbes expérimentales du carbone/époxy à 0 cycle

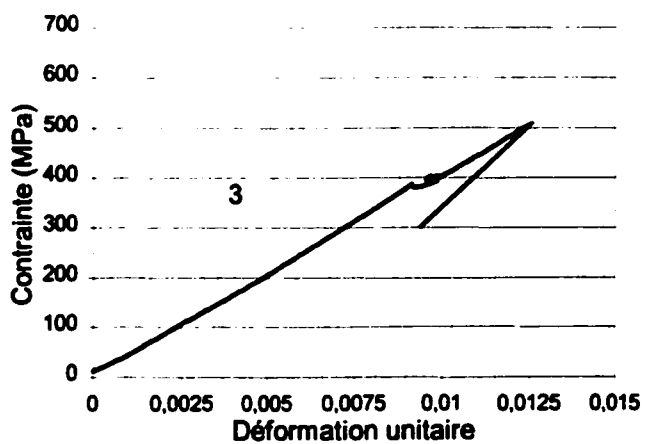
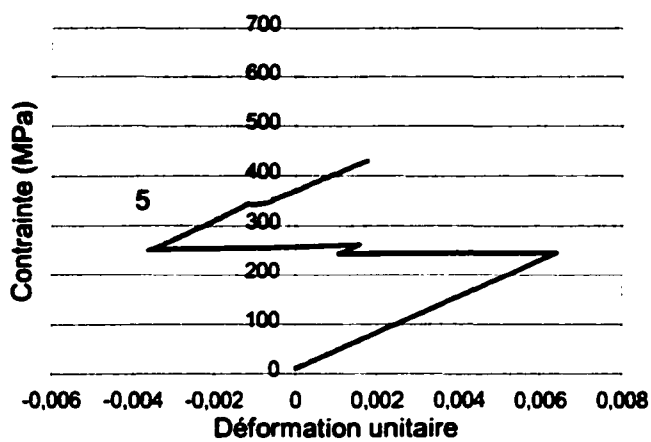
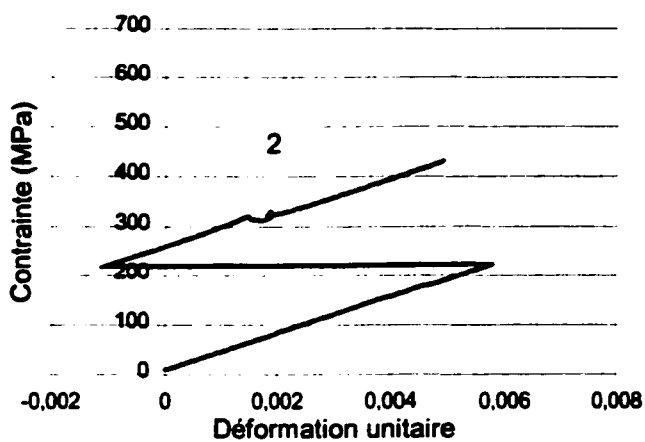
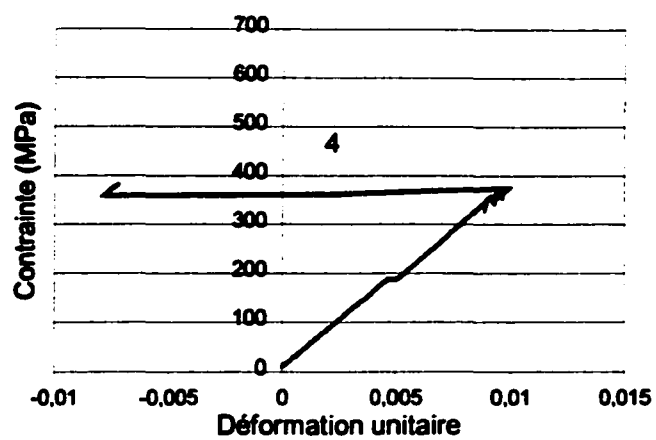
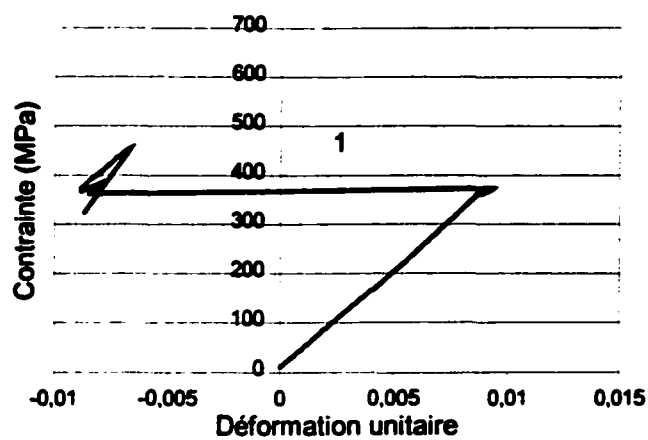


Figure A.14 - Courbes expérimentales du carbone/époxy après 300 cycles de gel-dégel

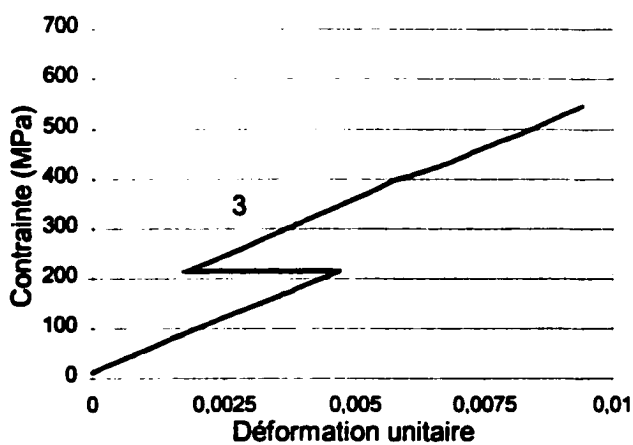
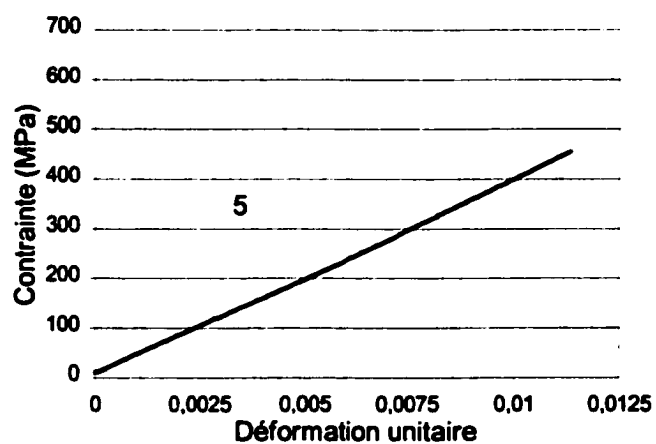
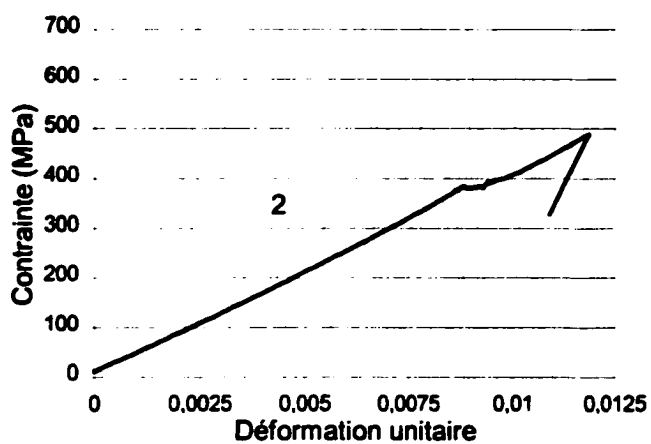
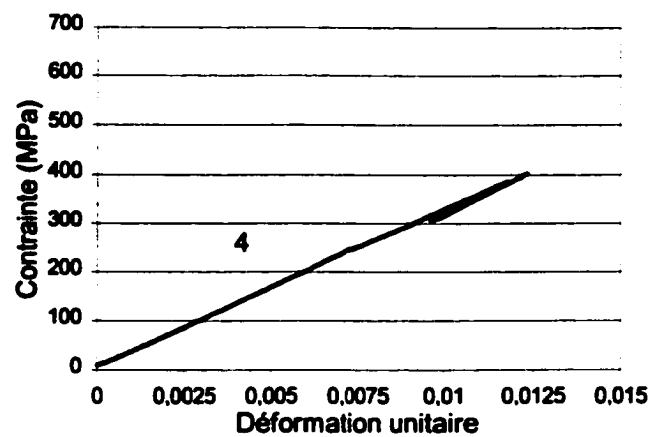
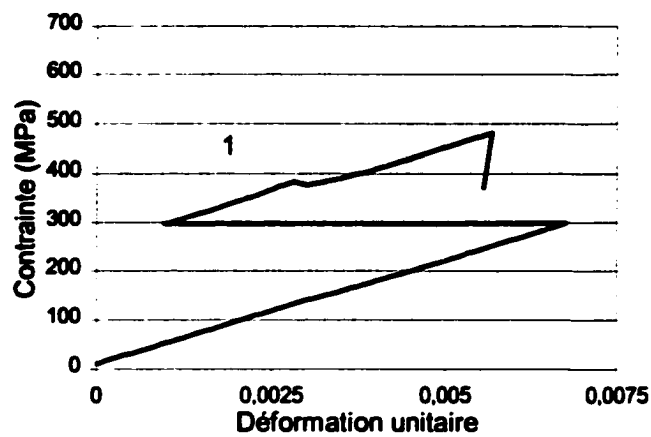


Figure A.15 - Courbes expérimentales du carbone/époxy après 600 cycles de gel-dégel

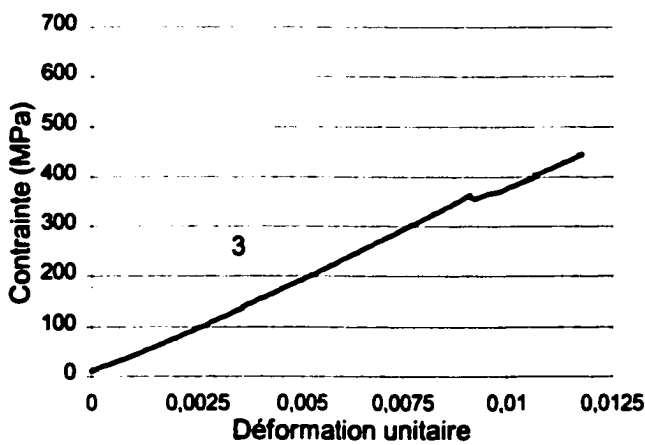
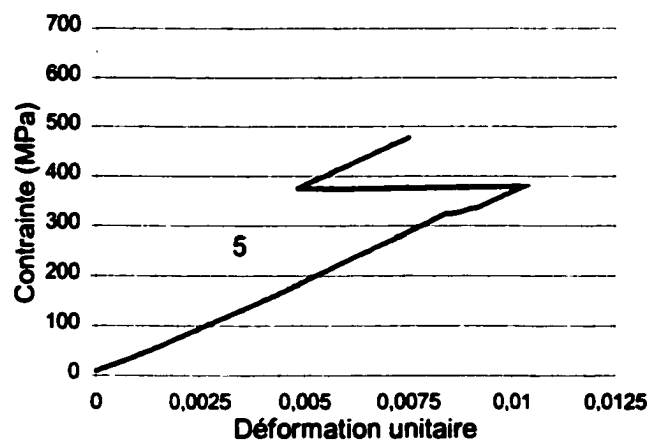
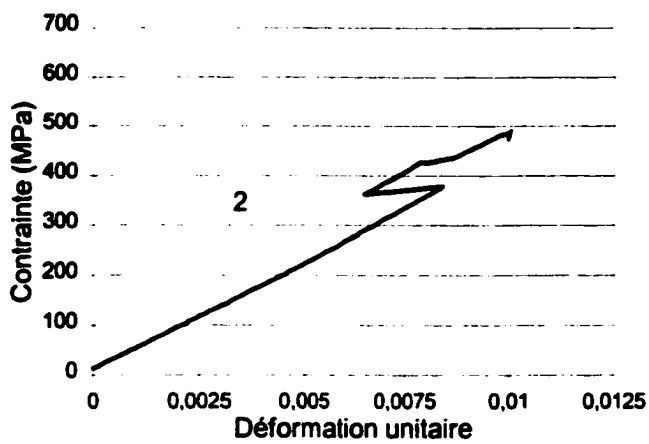
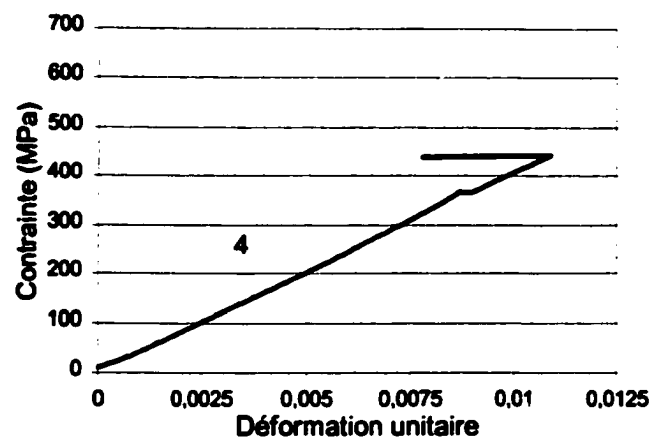
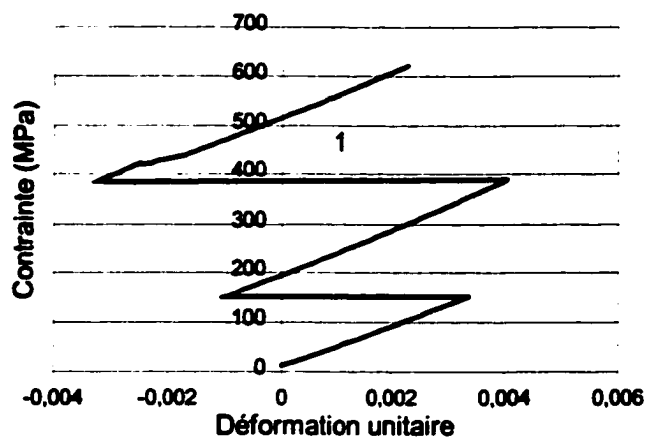


Figure A.16 - Courbes expérimentales du carbone/époxy après 900 cycles de gel-dégel

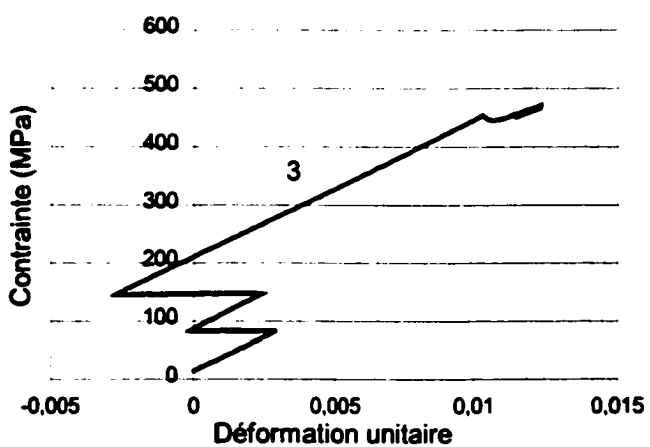
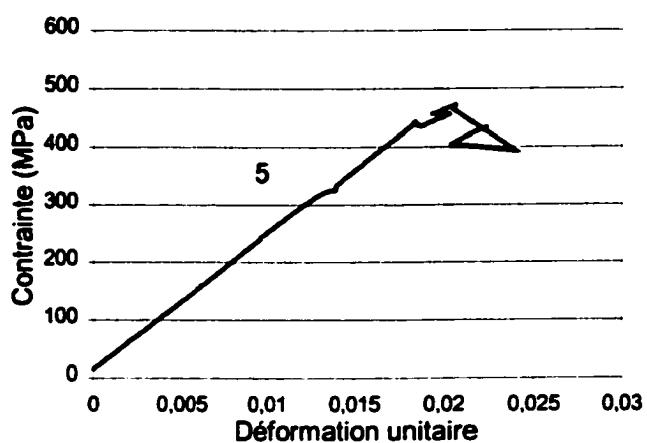
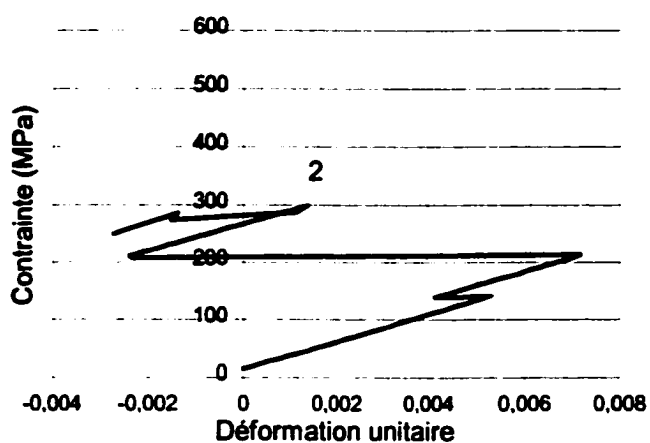
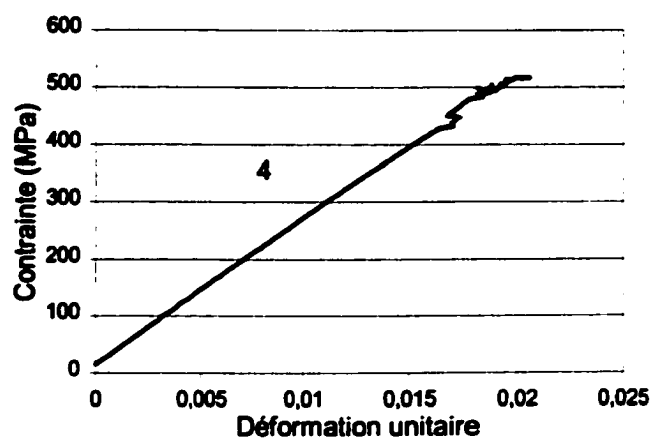
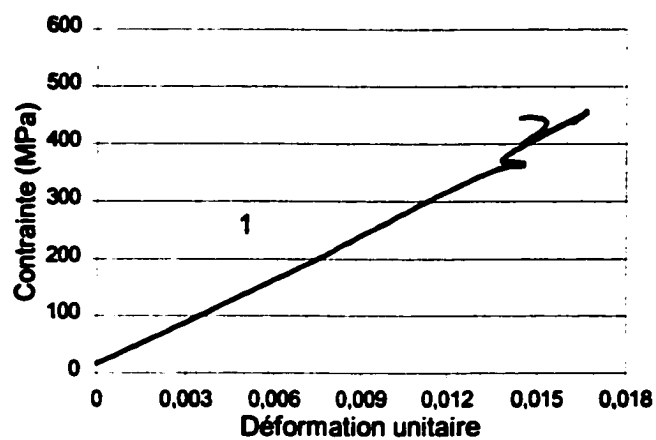


Figure A.17 - Courbes expérimentales du verre-E/époxy à 0 cycles

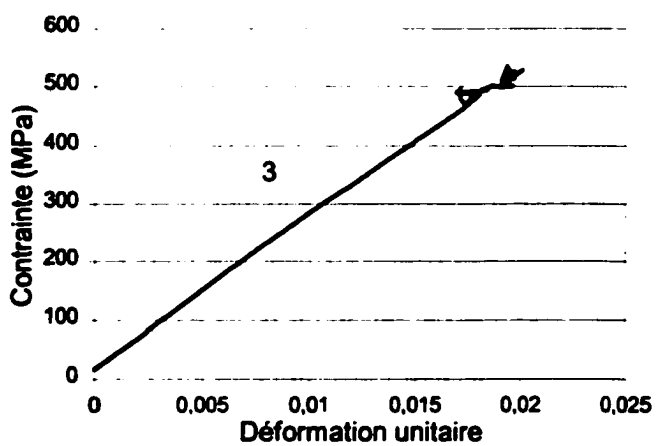
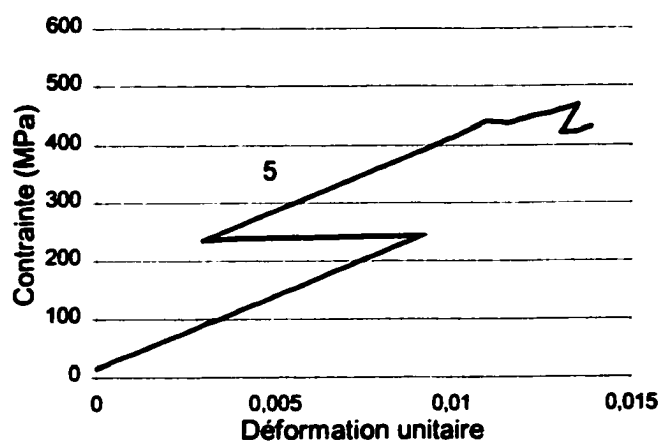
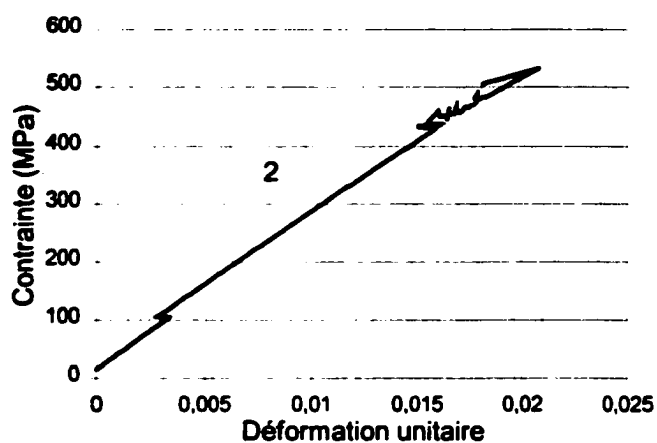
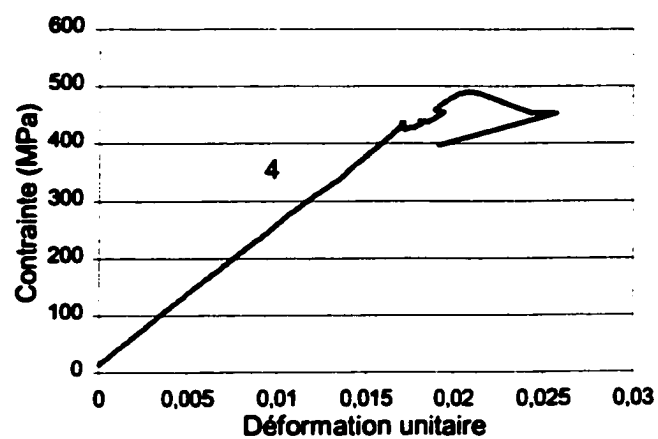
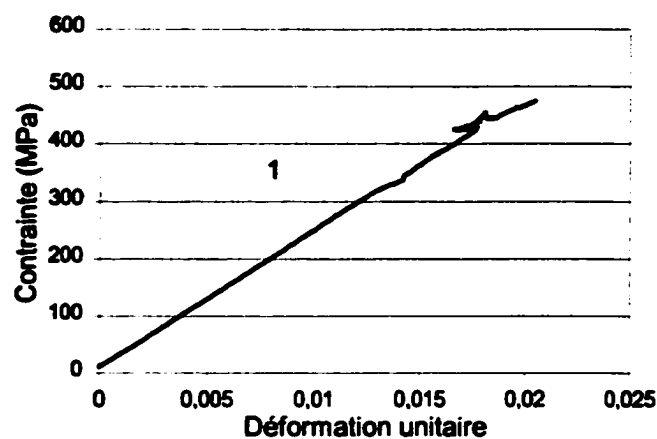


Figure A.18 - Courbes expérimentales du verre-E/époxy après 300 cycles de gel-dégel

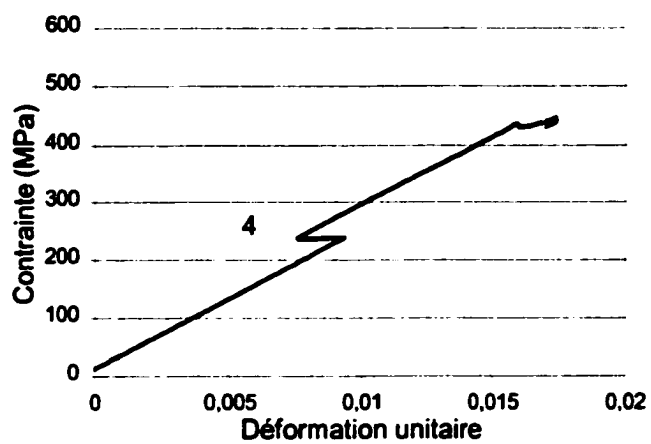
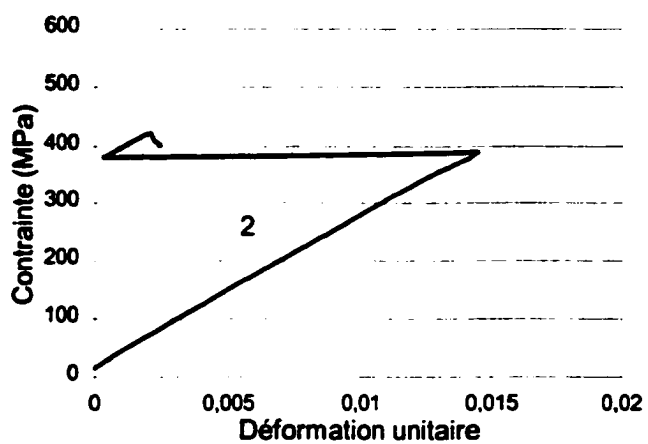
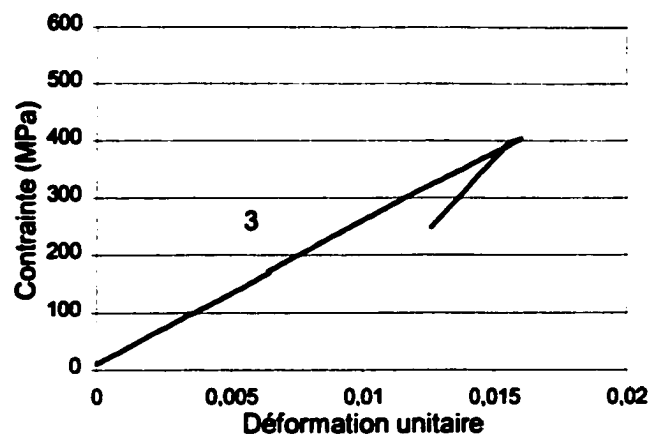
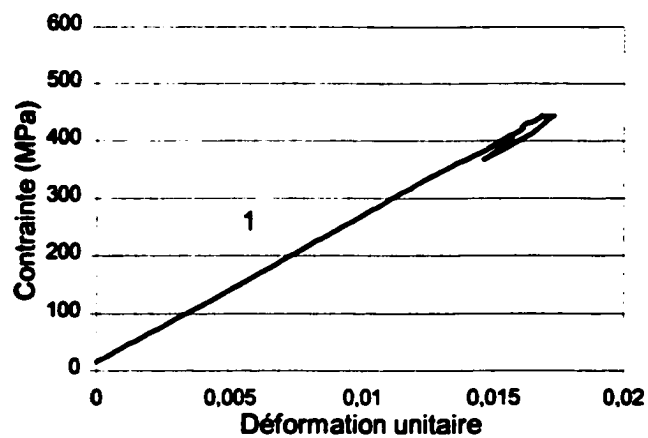


Figure A.19 - Courbes expérimentales du verre-E/époxy après 600 cycles de gel-dégel

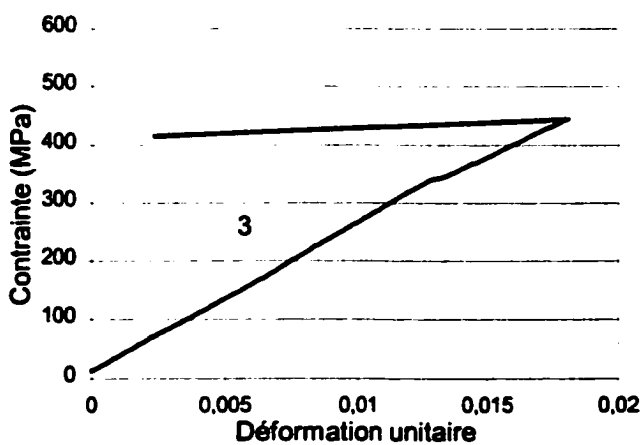
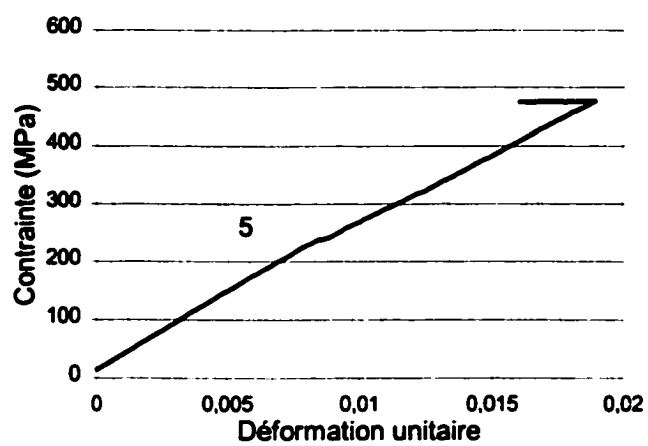
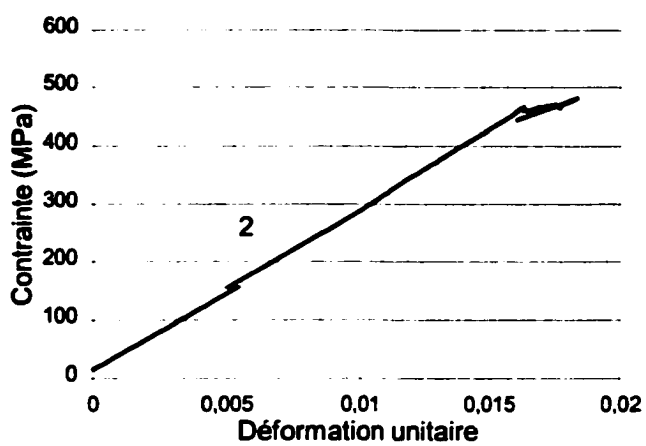
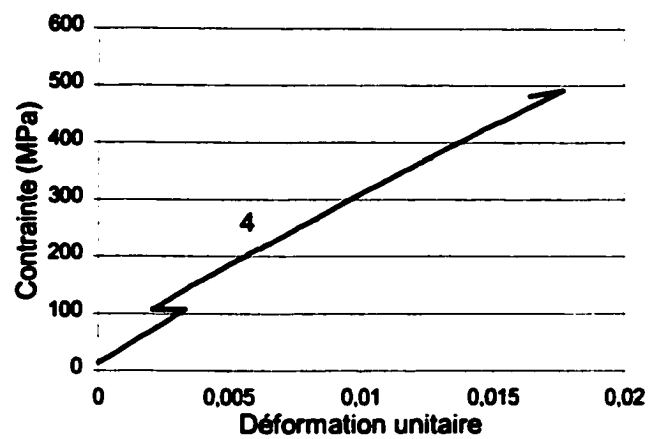
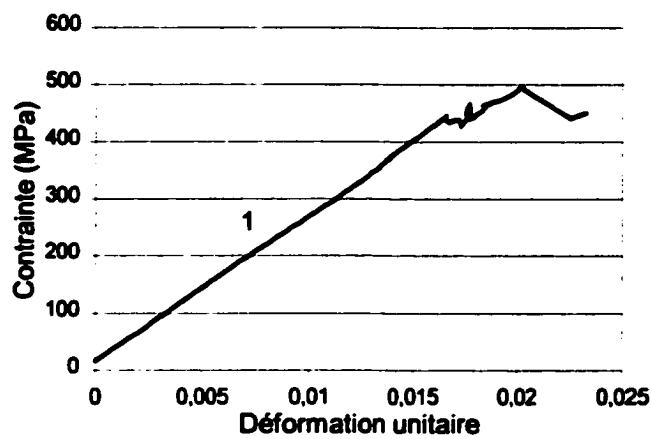


Figure A.20 - Courbes expérimentales du verre-E/époxy après 900 cycles de gel-dégel

Annexe B

COMPLÉMENT DE L'ANALYSE STATISTIQUE

B.1 TESTS COMPARATIFS AVEC LA MÉTHODE LSD

$$LSD = t_{\alpha, N-a} \sqrt{\frac{2MS_E}{n}}$$

Alors si la différence en valeur absolue entre les deux traitements est supérieure à la valeur de LSD, ceci indique qu'il y a une différence significative entre les traitements.

Effets de la température sur la contrainte ultime (4.3.2)

Carbone/époxy

$$LSD = 2.064 \sqrt{\frac{2 \cdot 5341.82}{5}}$$

$$LSD = 95.4$$

Traitement	Différence	
1 vs 2	75.99	
1 vs 3	83.01	
1 vs 4	24.28	
1 vs 5	41.54	
1 vs 6	300.21	s
2 vs 3	7.02	
2 vs 4	-51.71	
2 vs 5	-34.45	
2 vs 6	224.22	s
3 vs 4	-58.73	
3 vs 5	-41.47	
3 vs 6	217.21	s
4 vs 5	17.26	
4 vs 6	275.93	s
5 vs 6	258.67	s

Verre-E/époxy

$$LSD = 2.064 \sqrt{\frac{2 \cdot 1968.35}{5}}$$

$$LSD = 57.9$$

Traitement	Différence	
1 vs 2	-29.33	
1 vs 3	31.21	
1 vs 4	42.15	
1 vs 5	56.48	
1 vs 6	240.97	s
2 vs 3	60.54	s
2 vs 4	71.47	s
2 vs 5	85.8	s
2 vs 6	270.29	s
3 vs 4	10.94	
3 vs 5	25.27	
3 vs 6	209.76	s
4 vs 5	14.33	
4 vs 6	198.82	s
5 vs 6	184.49	s

N.B. : s indique qu'il y a une différence significative.

Effets de la température sur le module élastique (4.3.3)

Carbone/époxy

$$LSD = 2.064 \sqrt{\frac{2 \cdot 2.31E7}{5}}$$

$$LSD = 6274$$

Traitement	Différence
1 vs 2	2896
1 vs 3	-949.4
1 vs 4	-3315.8
1 vs 5	-484.6
1 vs 6	4729
2 vs 3	-3845.4
2 vs 4	-6211.8
2 vs 5	-3380.6
2 vs 6	1833
3 vs 4	-2366.4
3 vs 5	464.8
3 vs 6	5678.4
4 vs 5	2831.2
4 vs 6	8044.8 s
5 vs 6	5213.6

Verre-E/époxy

$$LSD = 2.064 \sqrt{\frac{2 \cdot 2.714E6}{5}}$$

$$LSD = 2150.5$$

Traitement	Différence
1 vs 2	-661
1 vs 3	478.8
1 vs 4	922
1 vs 5	1913.2
1 vs 6	6076 s
2 vs 3	1139.8
2 vs 4	1583
2 vs 5	2574.2 s
2 vs 6	6737 s
3 vs 4	443.2
3 vs 5	1434.4
3 vs 6	5597.2 s
4 vs 5	991.2
4 vs 6	5154 s
5 vs 6	4162.8 s

Effets du gel-dégel sur la contrainte ultime (4.4.2)

Carbone/époxy

$$LSD = 2.12 \sqrt{\frac{2 \cdot 4268.43}{5}}$$

$$LSD = 87.6$$

Traitement	Différence
1 vs 2	65.79
1 vs 3	32.28
1 vs 4	12.8
2 vs 3	-33.5
2 vs 4	-52.98
3 vs 4	-19.48

Verre-E/époxy

$$LSD = 2.131 \sqrt{\frac{2 \cdot 2330.5}{5}}$$

$$LSD = 65.1$$

Traitement	Différence
1 vs 2	-56.58
1 vs 3	14.28
1 vs 4	-34.78
2 vs 3	70.86
2 vs 4	21.8
3 vs 4	-49.06

Effets du gel-dégel sur le module élastique (4.4.3)

Carbone/époxy

$$LSD = 2.12 \sqrt{\frac{2 \cdot 9.653E6}{5}}$$

$$LSD = 4165.8$$

Traitement	Différence
1 vs 2	899.6
1 vs 3	86.6
1 vs 4	-377.4
2 vs 3	-813
2 vs 4	-1277
3 vs 4	-464

Verre-E/époxy

$$LSD = 2.131 \sqrt{\frac{2 \cdot 1.175E6}{5}}$$

$$LSD = 1460.9$$

Traitement	Différence
1 vs 2	-973.2
1 vs 3	-856.7
1 vs 4	-1466.2
2 vs 3	116.5
2 vs 4	-493
3 vs 4	-609.5

B.2 ANALYSE DES RÉSIDUS

Effet de la température sur la contrainte ultime (4.3.2)

Carbone/époxy

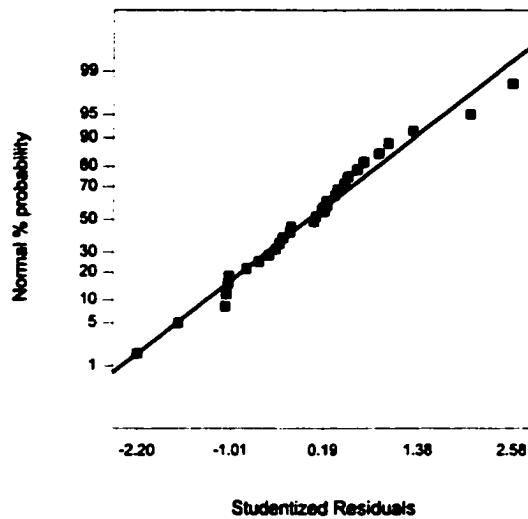


Figure B.1 - Graphique des probabilités normales des résidus pour la contrainte ultime du carbone/époxy

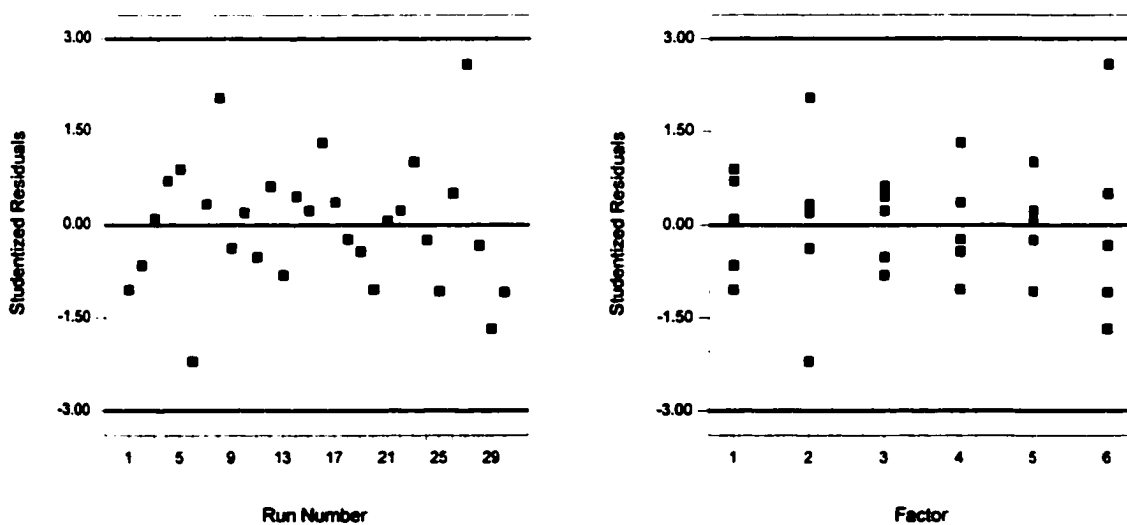


Figure B.2 - Graphique des résidus en fonction du rang de l'essai (à gauche) et graphique des résidus en fonction des niveaux de température (à droite) pour la contrainte ultime du carbone/époxy

Verre-E/époxy

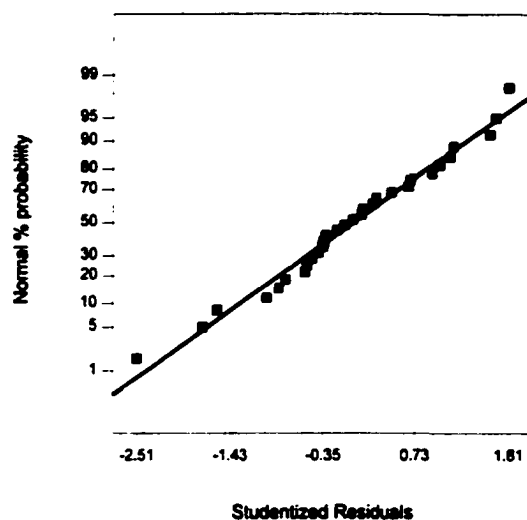


Figure B.3 - Graphique des probabilités normales des résidus pour la contrainte ultime du verre-E/époxy

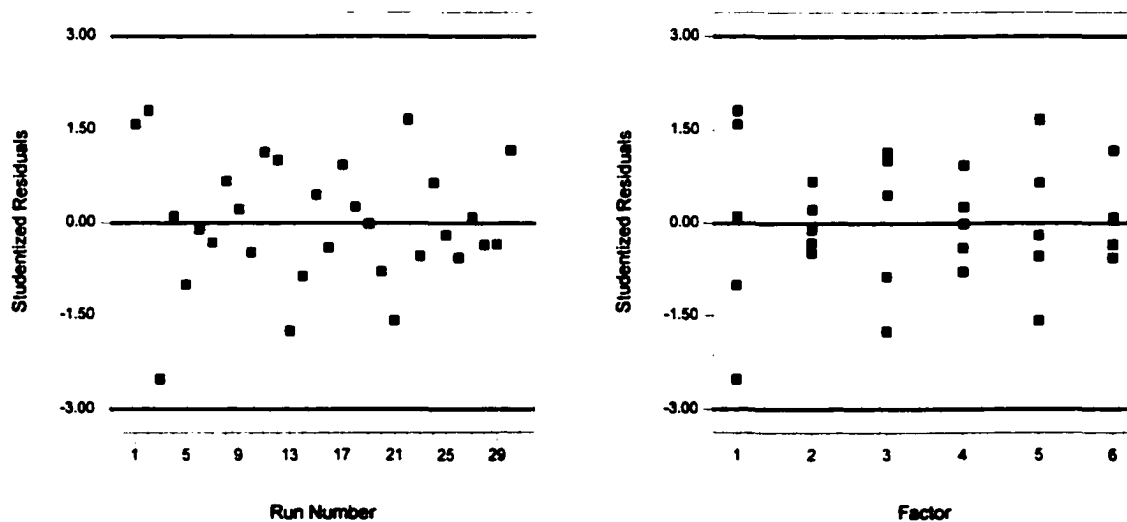


Figure B.4 - Graphique des résidus en fonction du rang de l'essai (à gauche) et graphique des résidus en fonction des niveaux de température (à droite) pour la contrainte ultime du verre-E/époxy

Effet de la température sur le module élastique (4.3.3)

Carbone/époxy

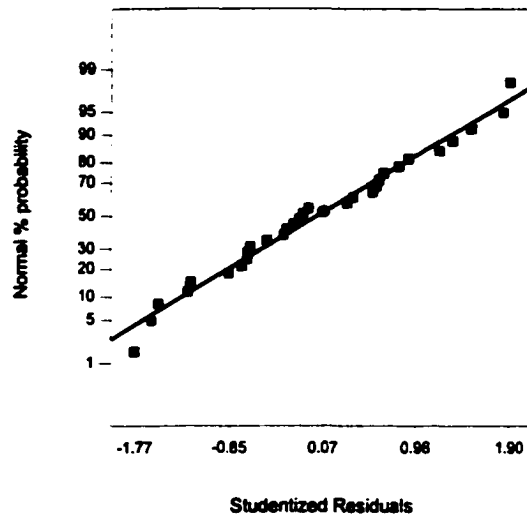


Figure B.5 - Graphique des probabilités normales des résidus pour le module élastique du carbone/époxy

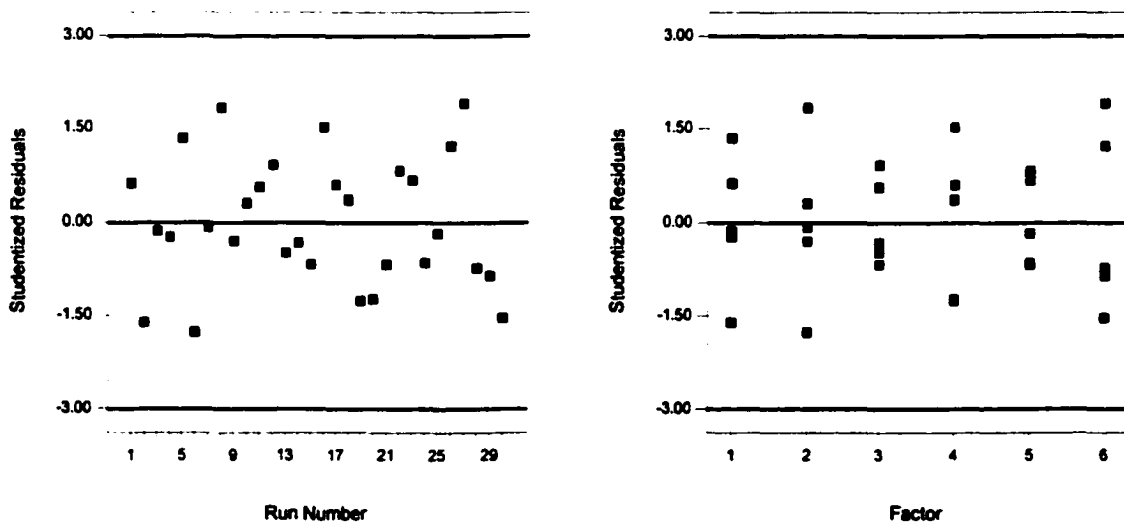


Figure B.6 - Graphique des résidus en fonction du rang de l'essai (à gauche) et graphique des résidus en fonction des niveaux de température (à droite) pour le module élastique du carbone/époxy

Verre-E/époxy

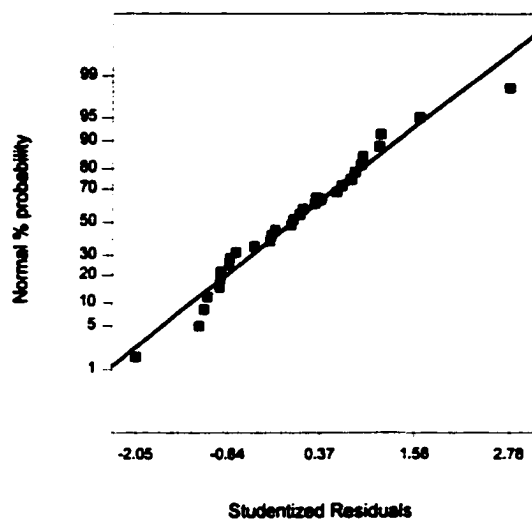


Figure B.7 - Graphique des probabilités normales des résidus pour le module élastique du verre-E/époxy

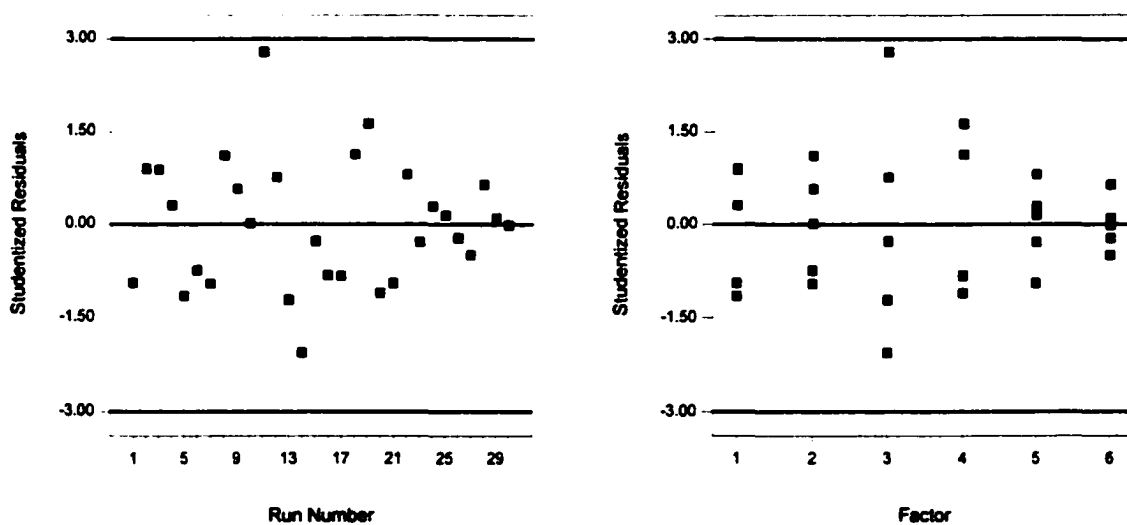


Figure B.8 - Graphique des résidus en fonction du rang de l'essai (à gauche) et graphique des résidus en fonction des niveaux de température (à droite) pour le module élastique du verre-E/époxy

Effet du gel-dégel sur la contrainte ultime (4.4.2)

Carbone/époxy

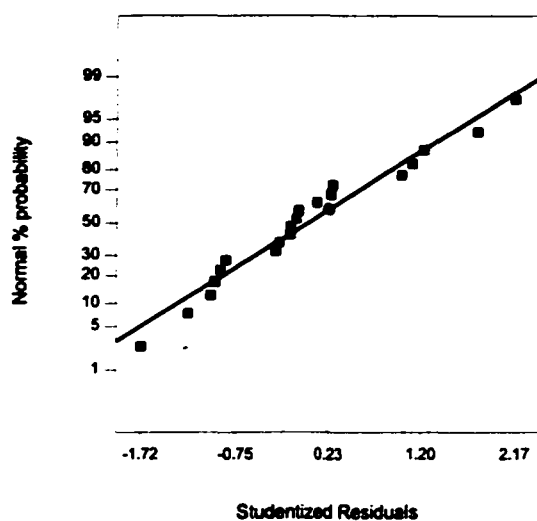


Figure B.9 - Graphique des probabilités normales des résidus pour la contrainte ultime du carbone/époxy

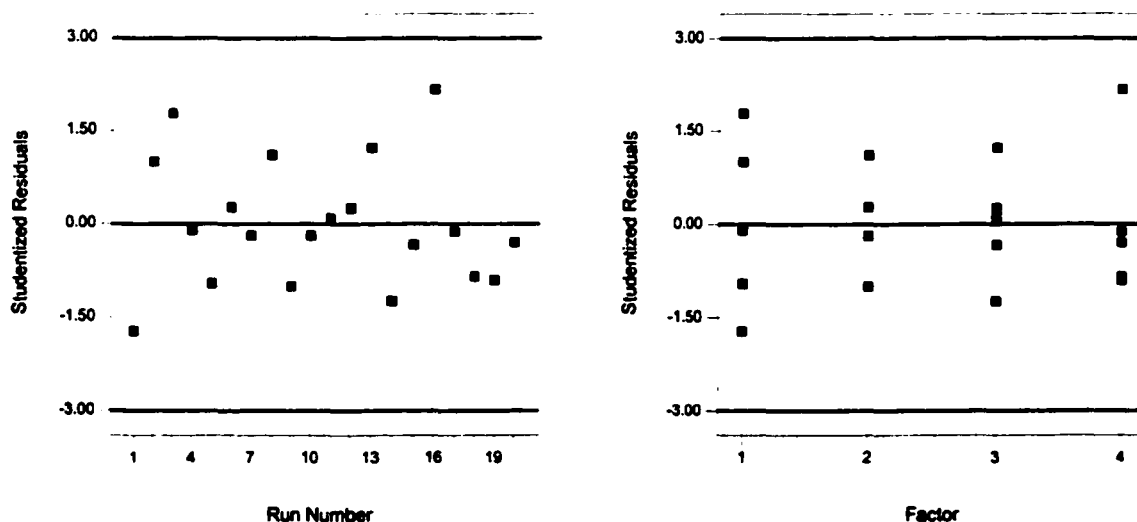


Figure B.10 - Graphique des résidus en fonction du rang de l'essai (à gauche) et graphique des résidus en fonction des cycles de gel-dégel (à droite) pour la contrainte ultime du carbone/époxy

Verre-E/époxy

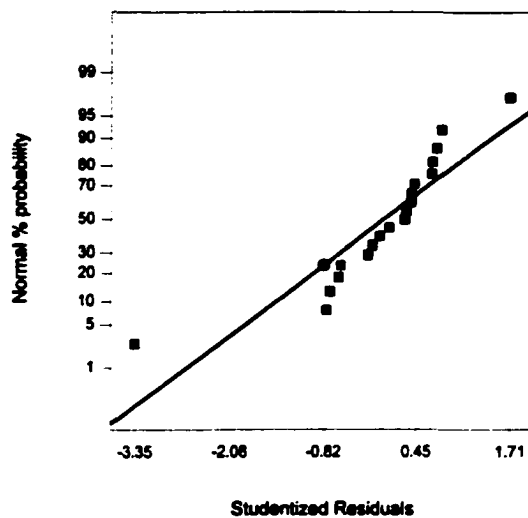


Figure B.11 - Graphique des probabilités normales des résidus pour la contrainte ultime du verre-E/époxy

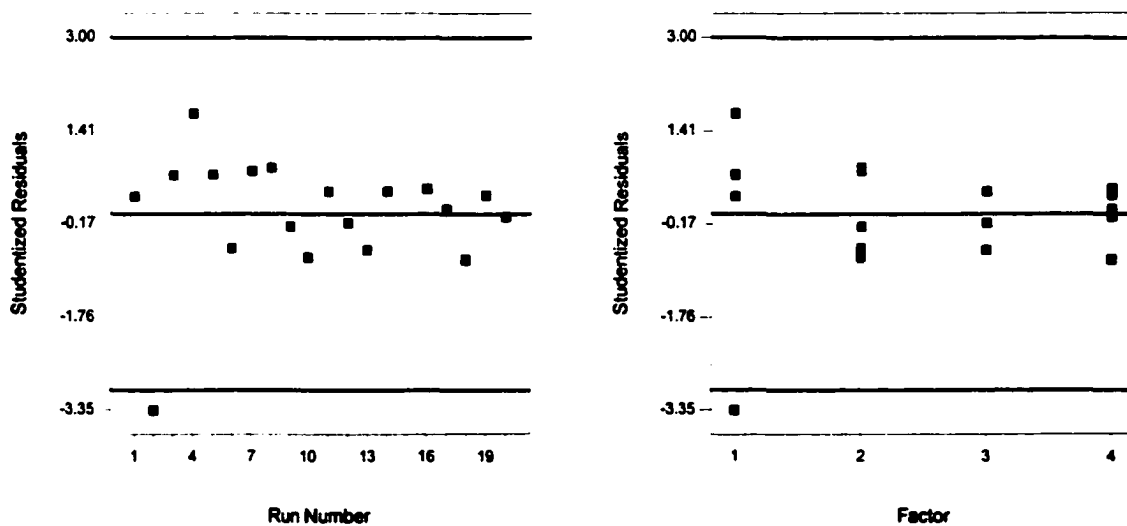


Figure B.12 - Graphique des résidus en fonction du rang de l'essai (à gauche) et graphique des résidus en fonction des cycles de gel-dégel (à droite) pour la contrainte ultime du verre-E/époxy

Effet du gel-dégel sur le module élastique (4.4.3)

Carbone/époxy

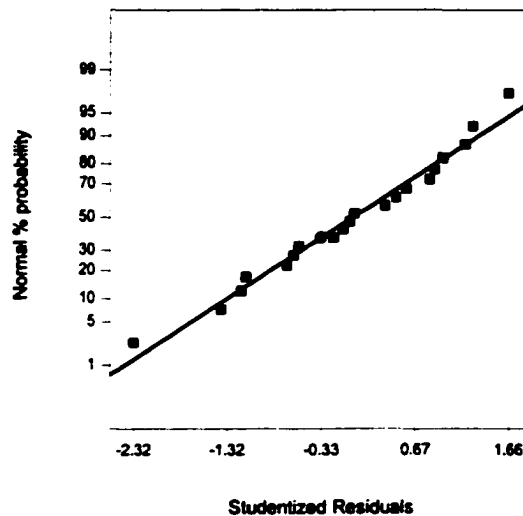


Figure B.13 - Graphique des probabilités normales des résidus pour le module élastique du carbone/époxy

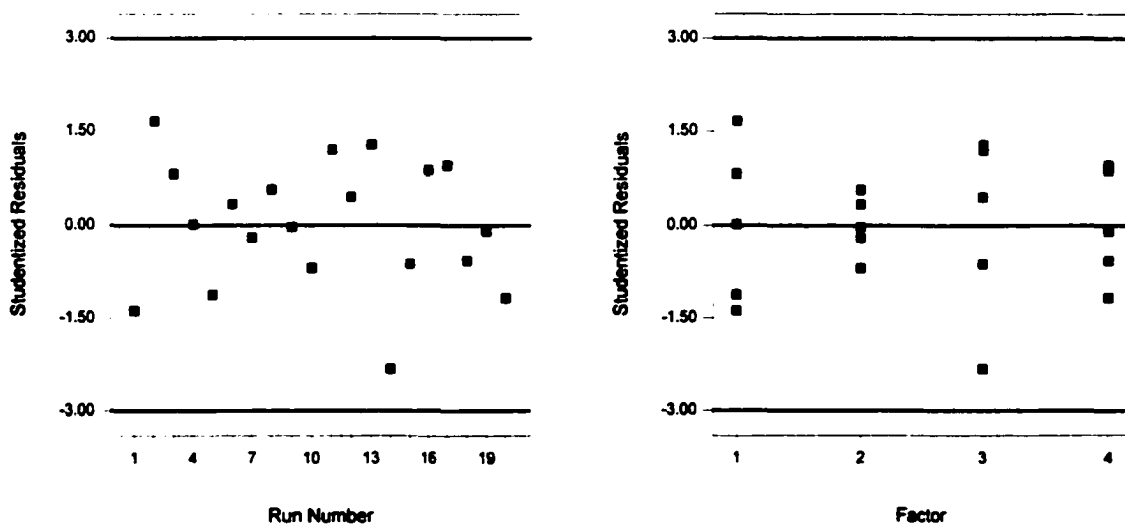


Figure B.14 - Graphique des résidus en fonction du rang de l'essai (à gauche) et graphique des résidus en fonction des cycles de gel-dégel (à droite) pour le module élastique du carbone/époxy

Verre-E/époxy

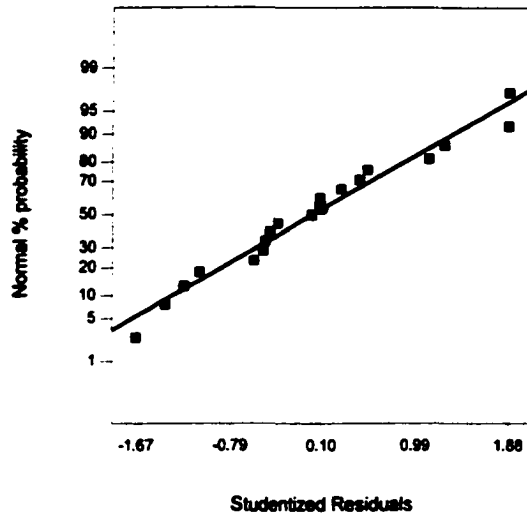


Figure B.15 - Graphique des probabilités normales des résidus pour le module élastique du verre-E/époxy

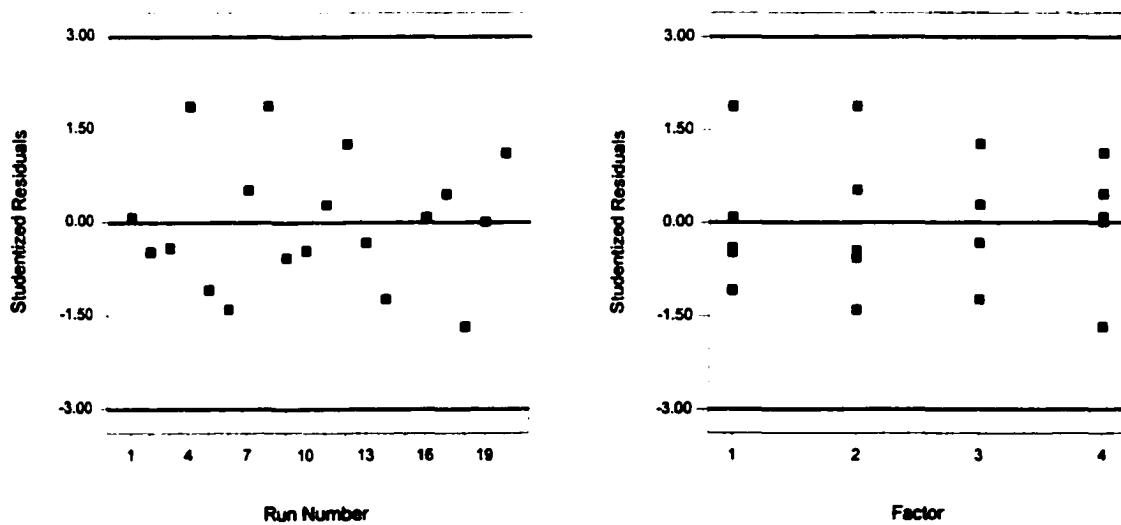
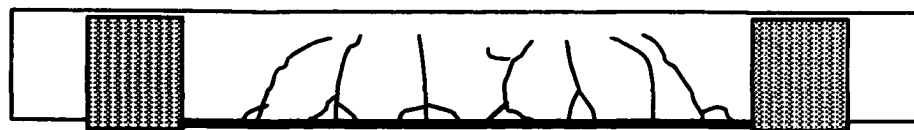


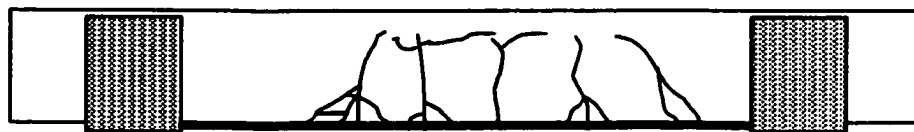
Figure B.16 - Graphique des résidus en fonction du rang de l'essai (à gauche) et graphique des résidus en fonction des cycles de gel-dégel (à droite) pour le module élastique du verre-E/époxy

Annexe C

RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES SUR LES EFFETS DES CYCLES DE MOUILLAGE-SÉCHAGE



P0-Repla-A



P0-Repla-B



P13-Repla-A



P13-Repla-B

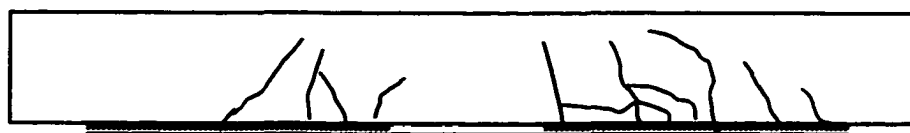


P26-Repla-A



P26-Repla-B

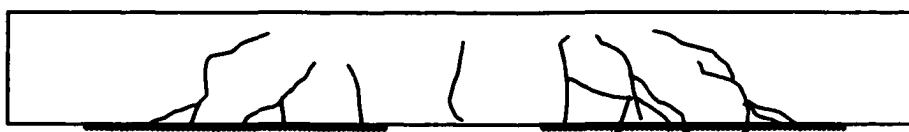
Figure C.1 - Réseau de fissuration à l'ultime des poutres renforcées de Replark 20



P0-Sika-A



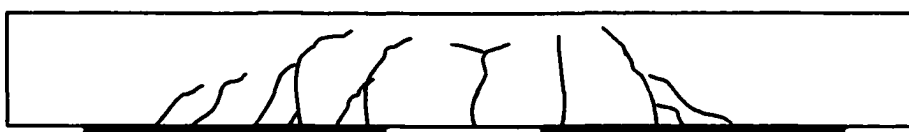
P0-Sika-B



P13-Sika-A



P13-Sika-B



P26-Sika-A



P26-Sika-B

Figure C.2 - Réseau de fissuration à l'ultime des poutres renforcées de Carbodur S

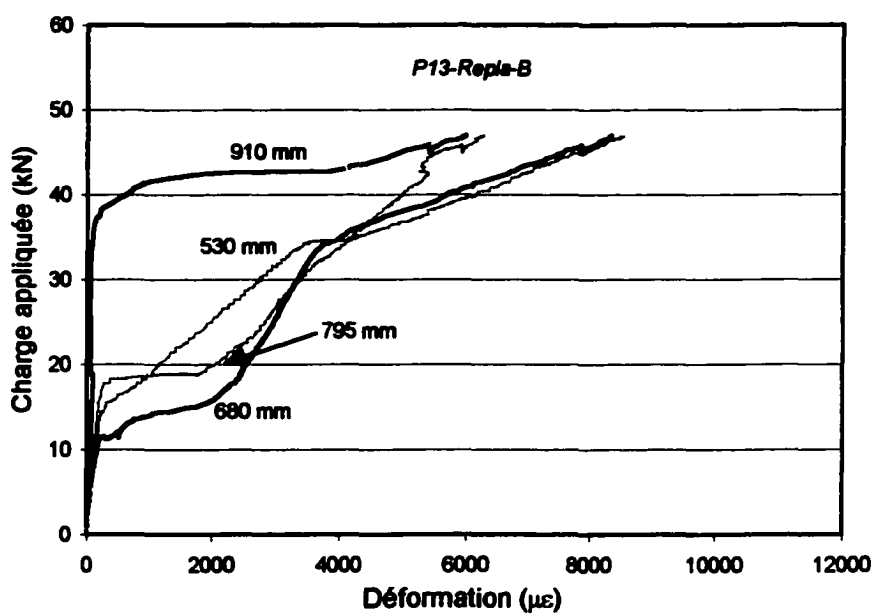
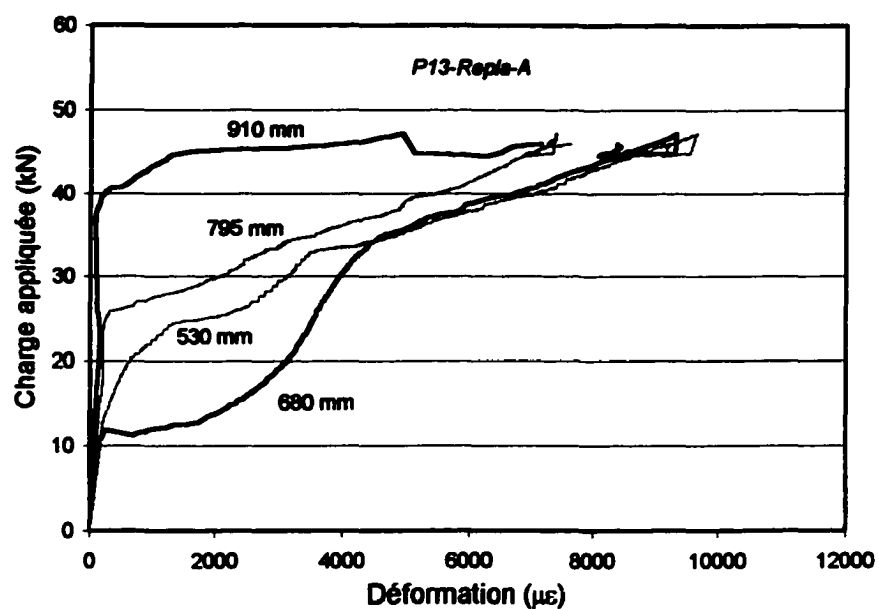


Figure C.3 - Charge appliquée et déformations du Replark 20 sur les poutres après 13 cycles de mouillage-séchage

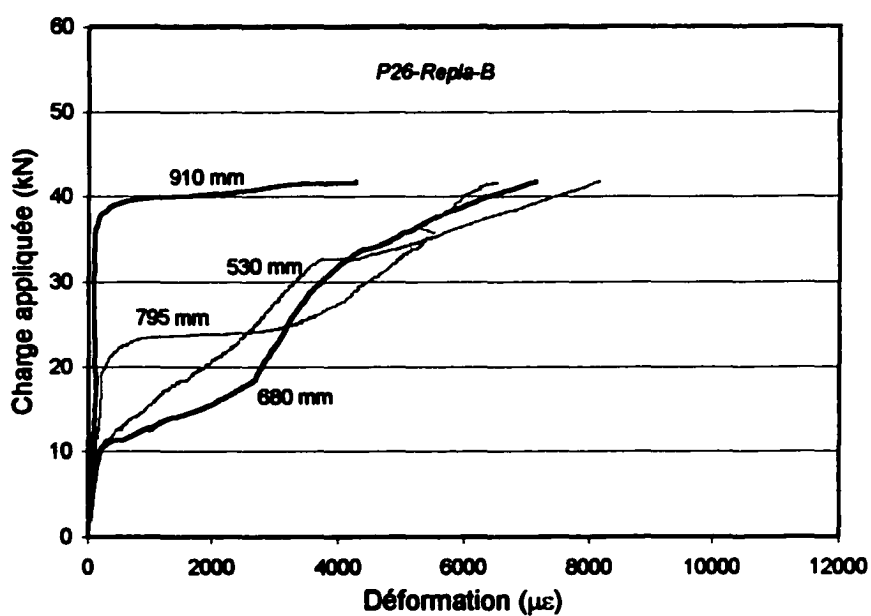
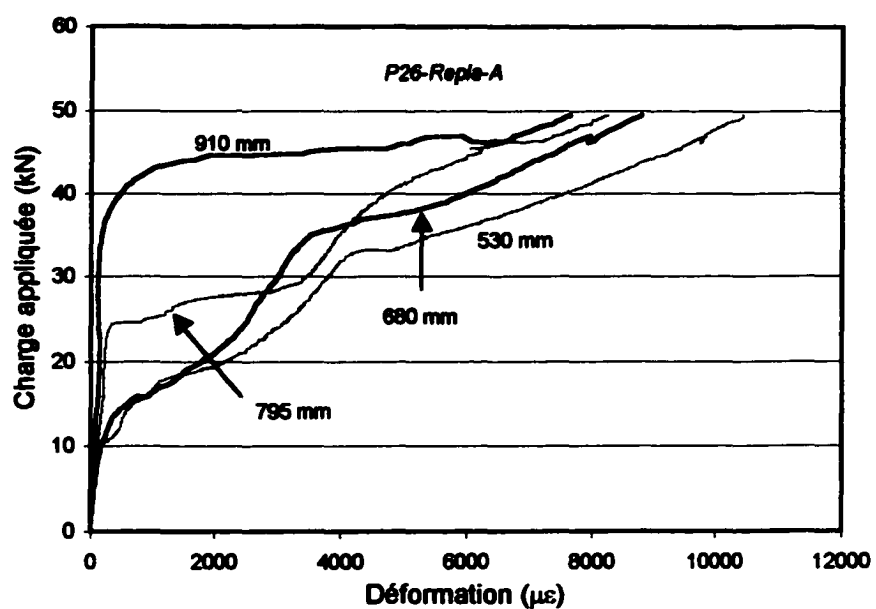


Figure C.4 - Charge appliquée et déformations du Replark 20 sur les poutres après 26 cycles de mouillage-séchage

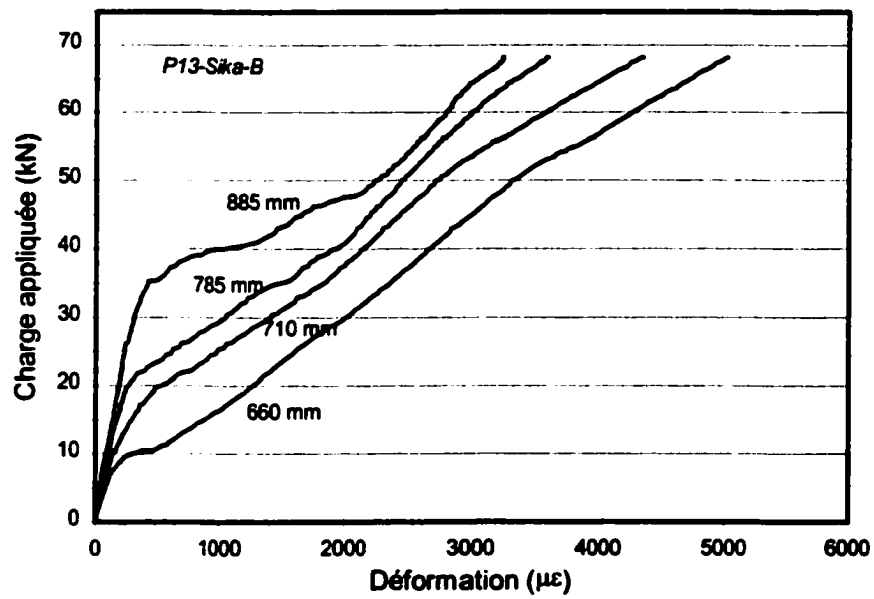
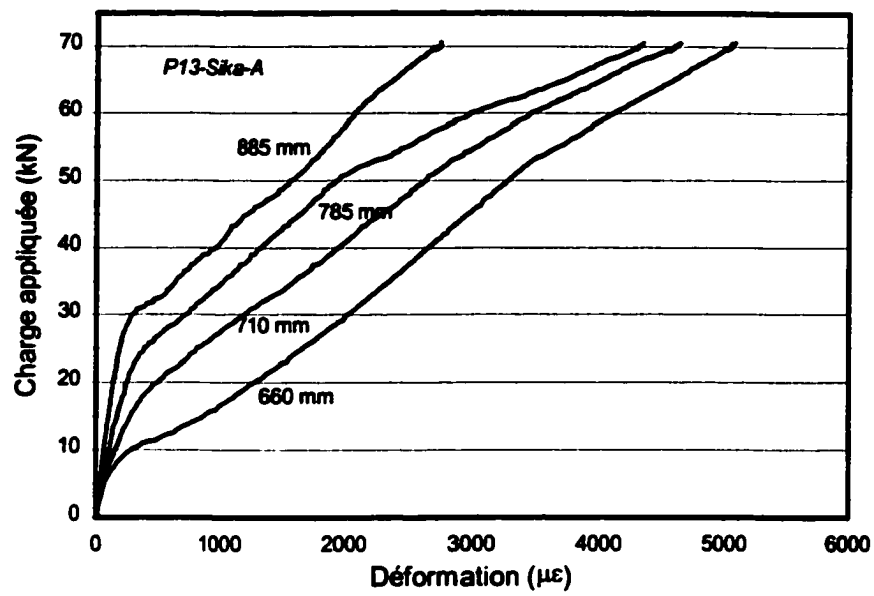


Figure C.5 - Charge appliquée et déformations du Carbodur S sur les poutres après 13 cycles de mouillage-séchage

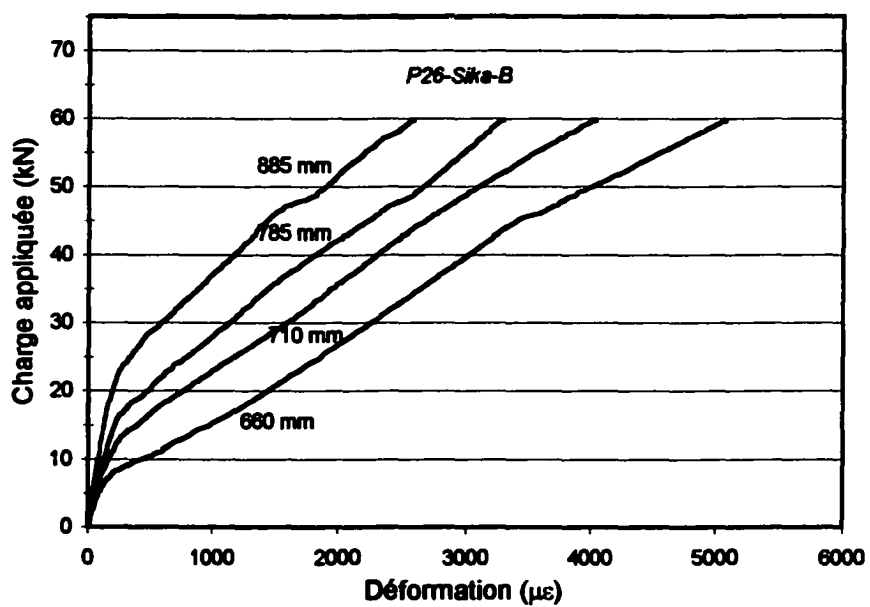
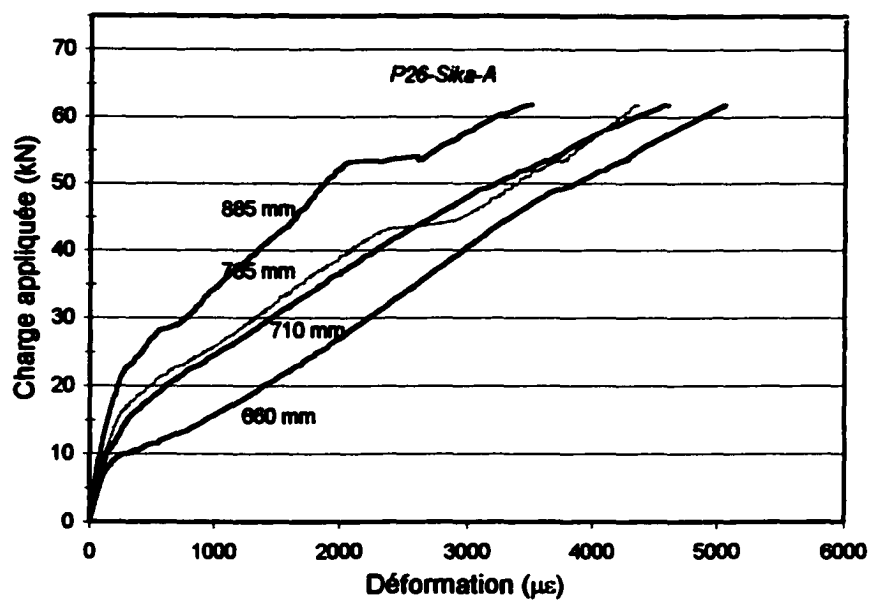


Figure C.6 - Charge appliquée et déformations du Carbodur S sur les poutres après 26 cycles de mouillage-séchage

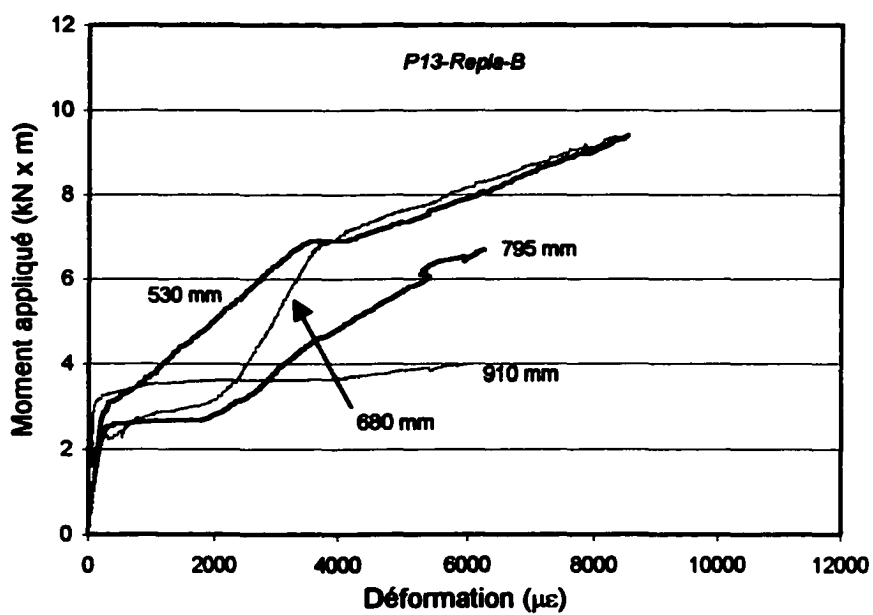
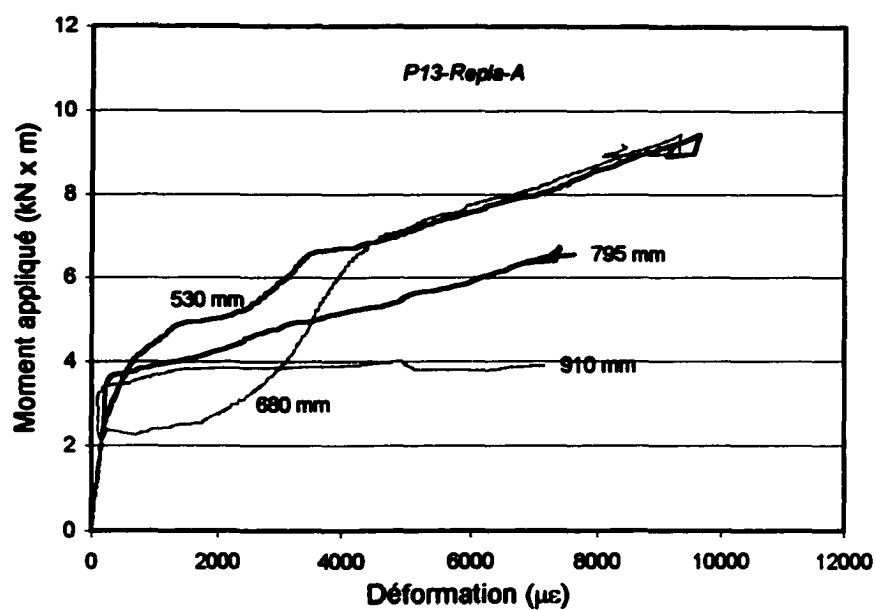


Figure C.7 - Moment appliqué et déformations du Replark 20 pour les poutres après 13 cycles de mouillage-séchage

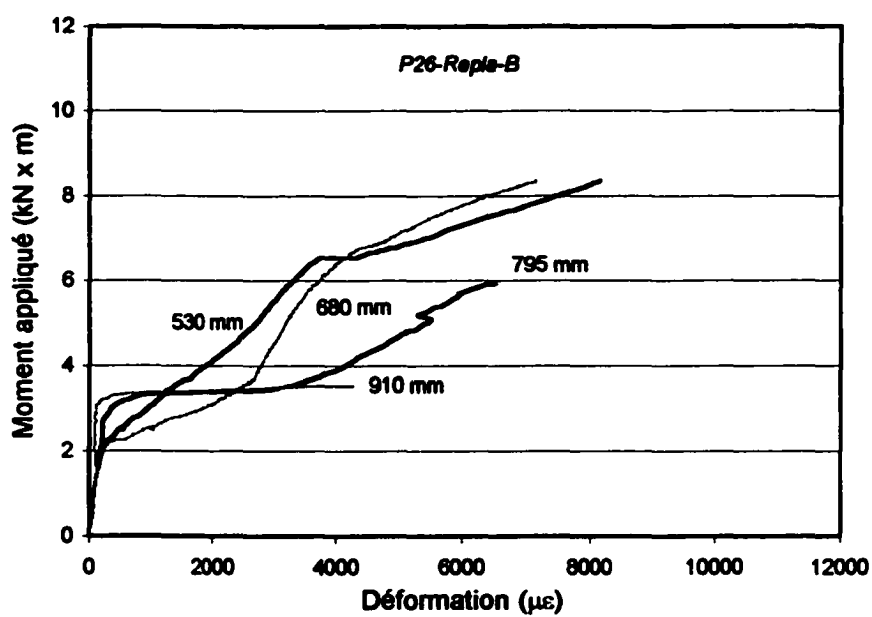
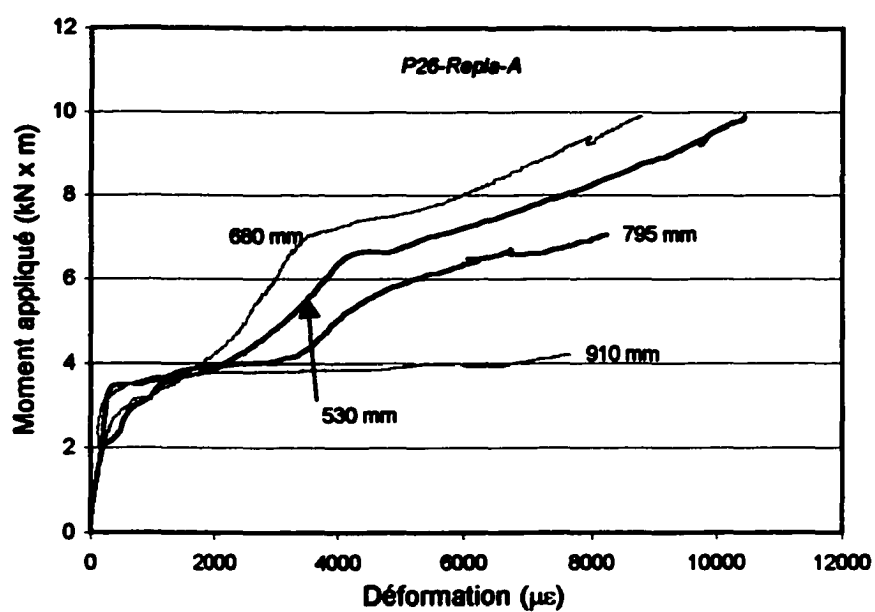


Figure C.8 - Moment appliqué et déformations du Replark 20 pour les poutres après 26 cycles de mouillage-séchage

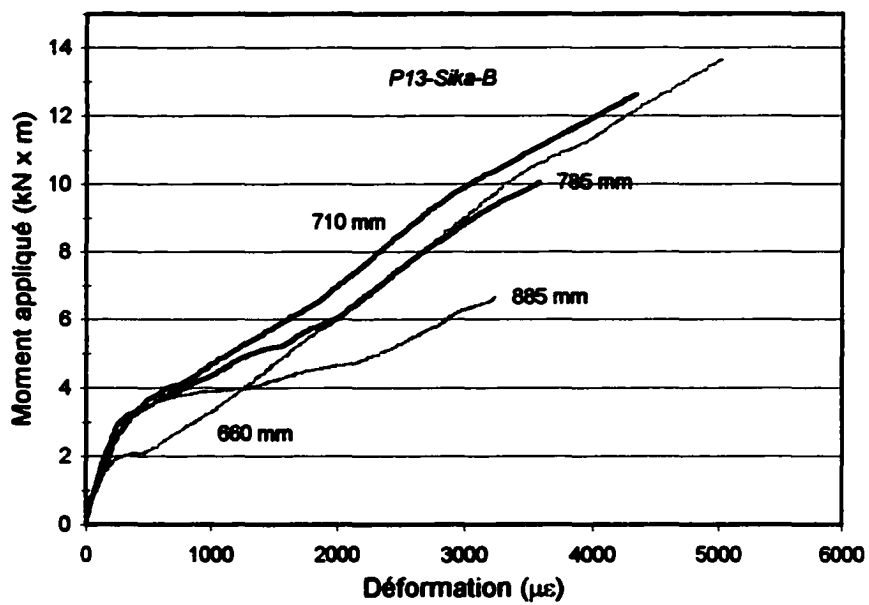
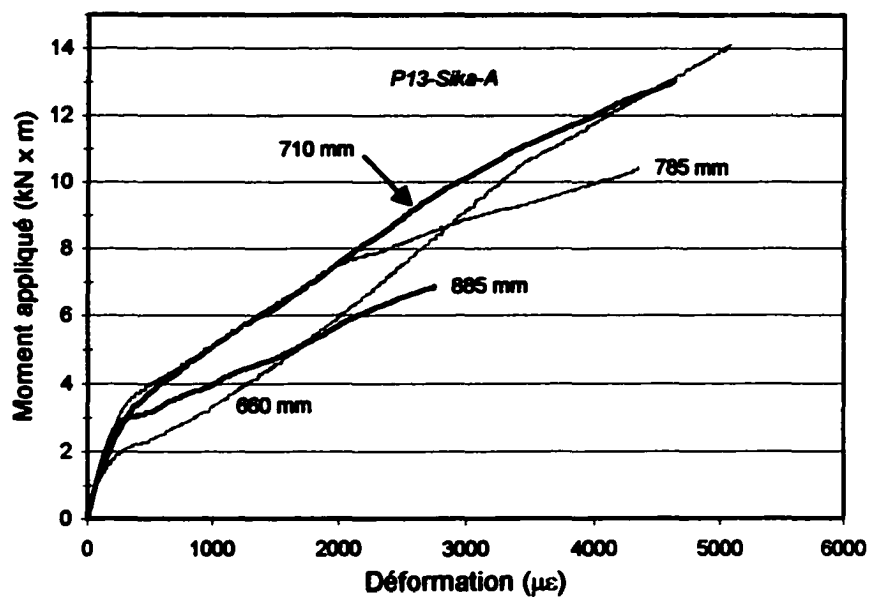


Figure C.9 - Moment appliqué et déformations du Carbodur S pour les poutres après 13 cycles de mouillage-séchage

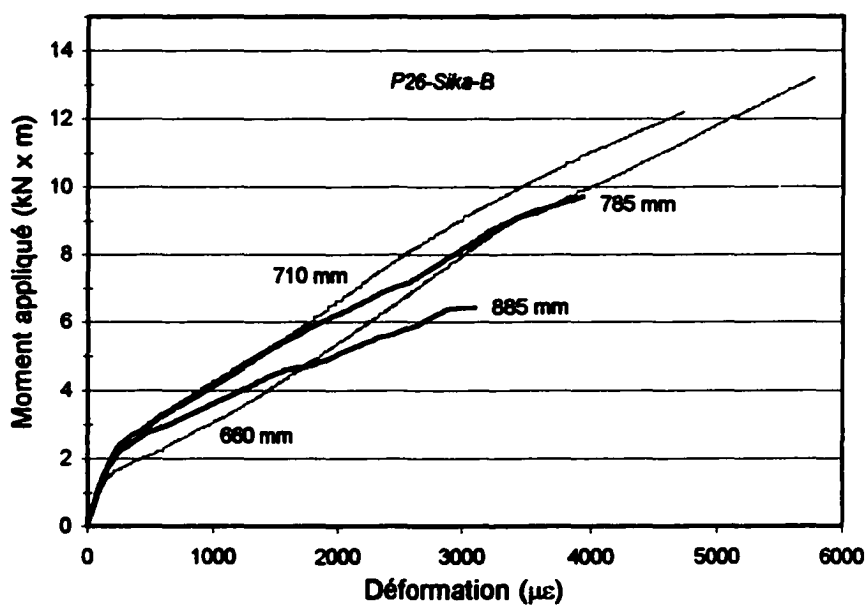
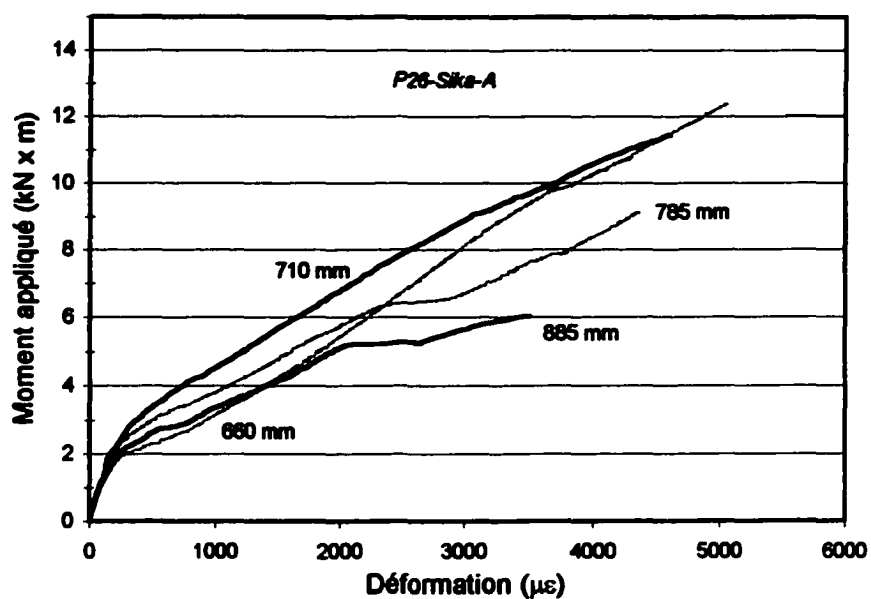


Figure C.10 - Moment appliqué et déformations du Carbodur S pour les poutres après 26 cycles de mouillage-séchage

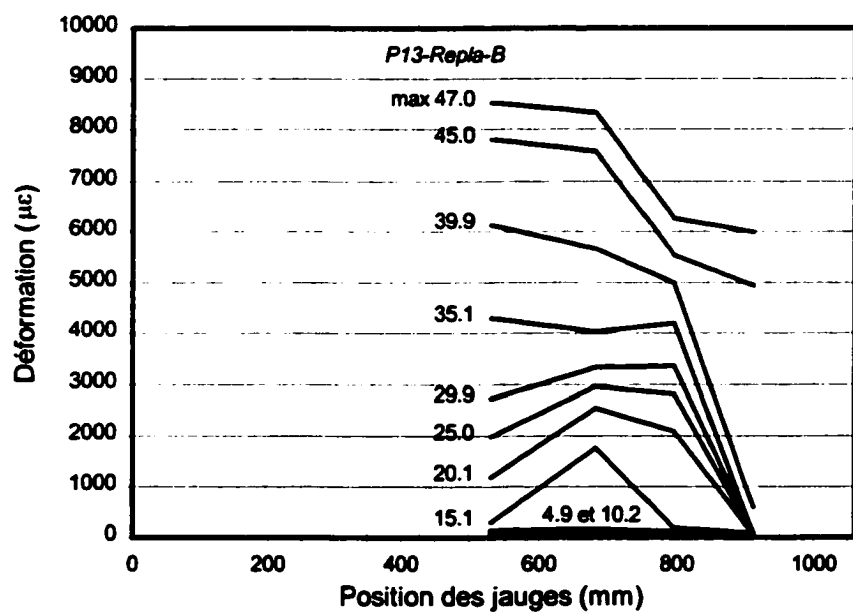
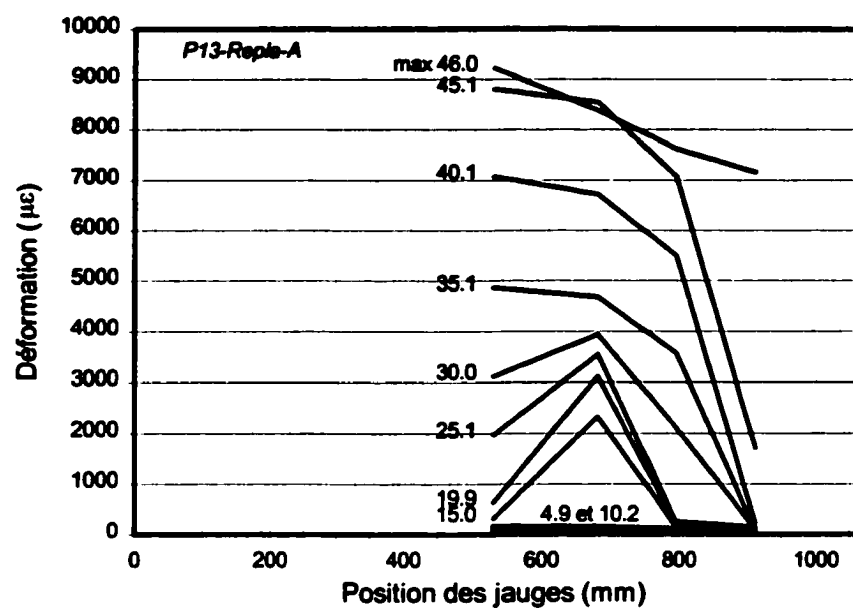


Figure C.11 - Profil des déformations le long du Replark 20 pour les poutres après 13 cycles de mouillage-séchage en fonction de la charge appliquée

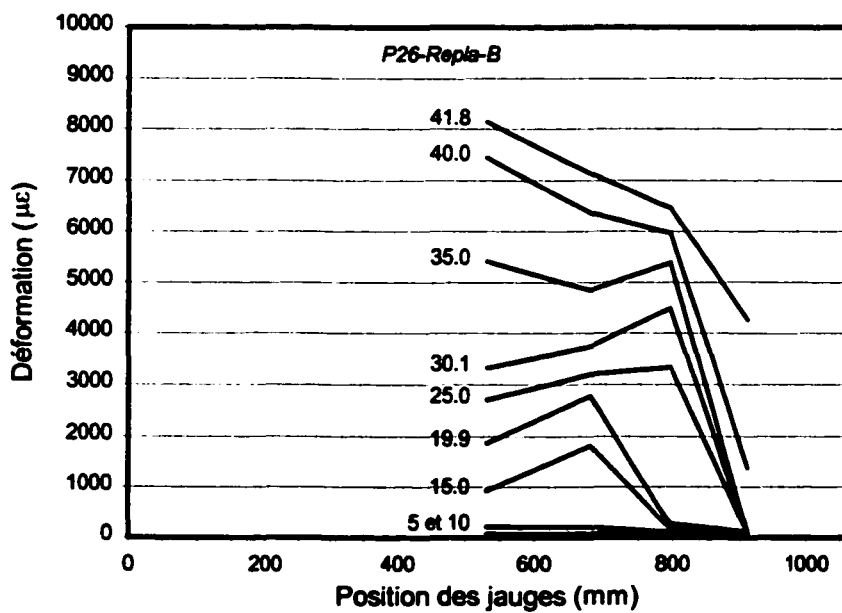
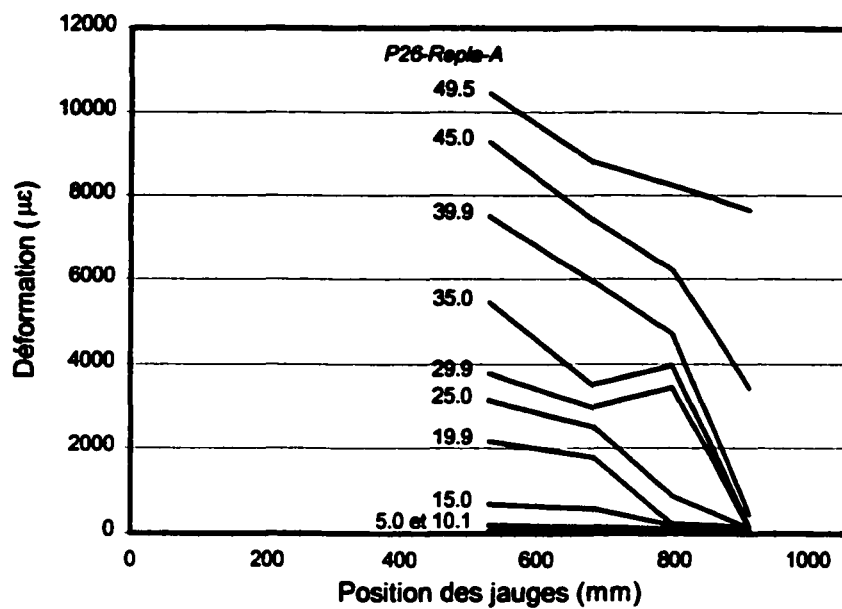


Figure C.12 - Profil des déformations le long du Replark 20 pour les poutres après 26 cycles de mouillage-séchage en fonction de la charge appliquée

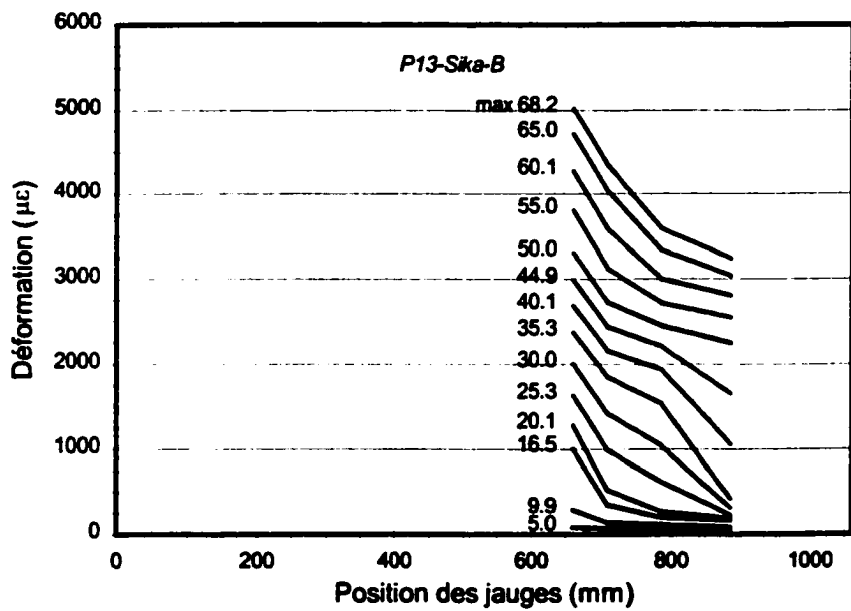
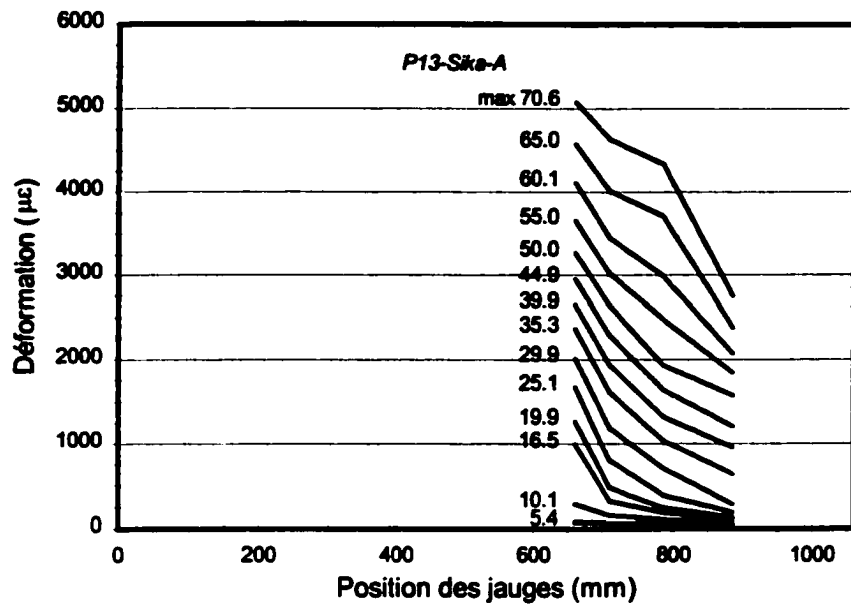


Figure C.13 - Profil des déformations le long du Carbodur S pour les poutres après 13 cycles de mouillage-séchage en fonction de la charge appliquée

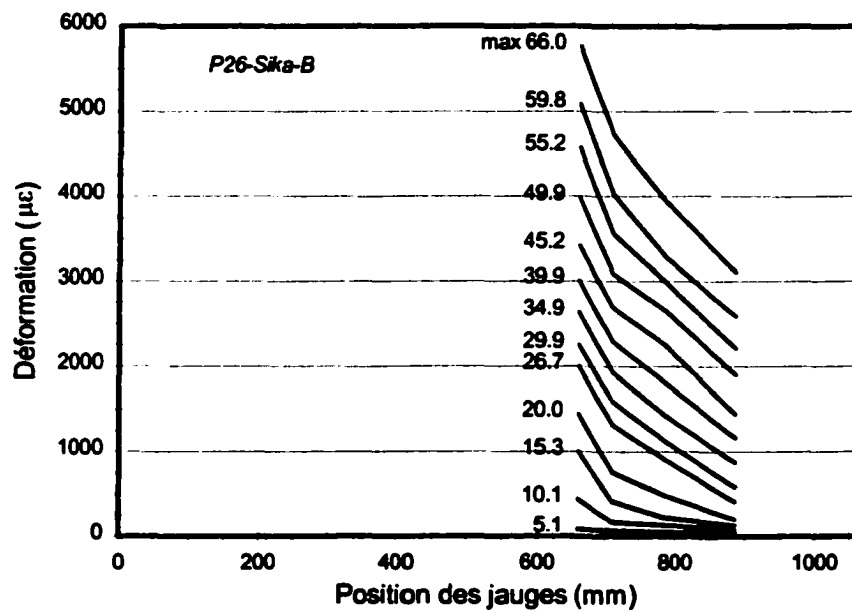
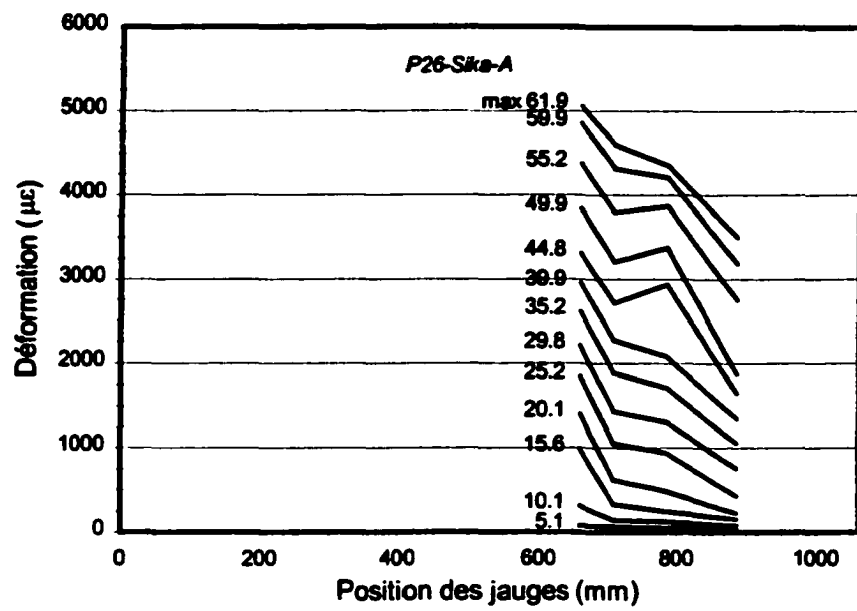


Figure C.14 - Profil des déformations le long du Carbodur S pour les poutres après 26 cycles de mouillage-séchage en fonction de la charge appliquée

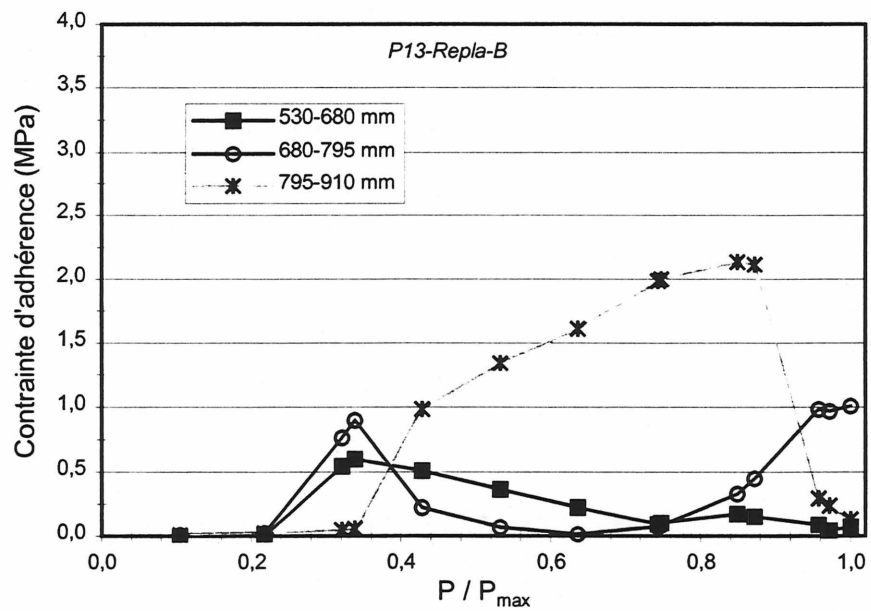
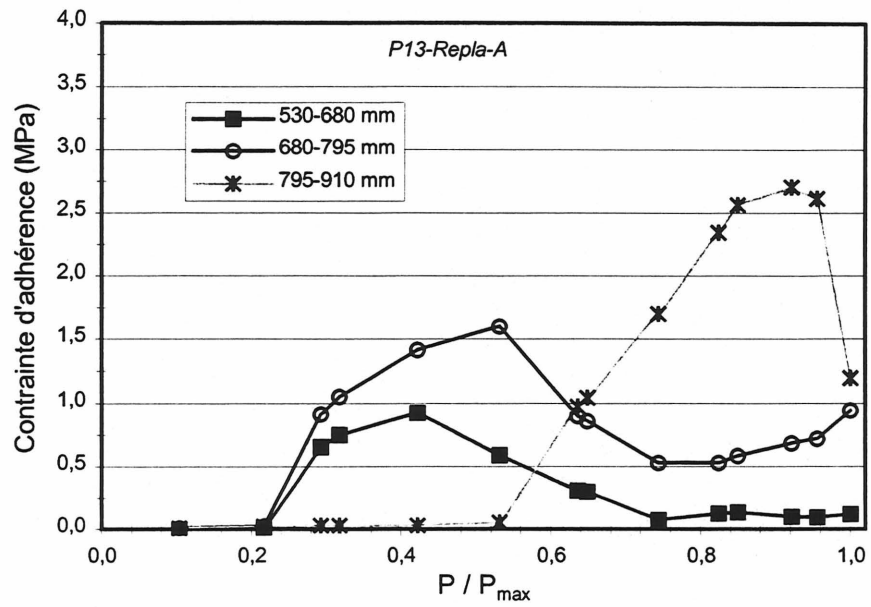


Figure C.15 - Contrainte d'adhérence en fonction du niveau relatif du chargement des poutres avec le Replark 20 après 13 cycles de mouillage-séchage

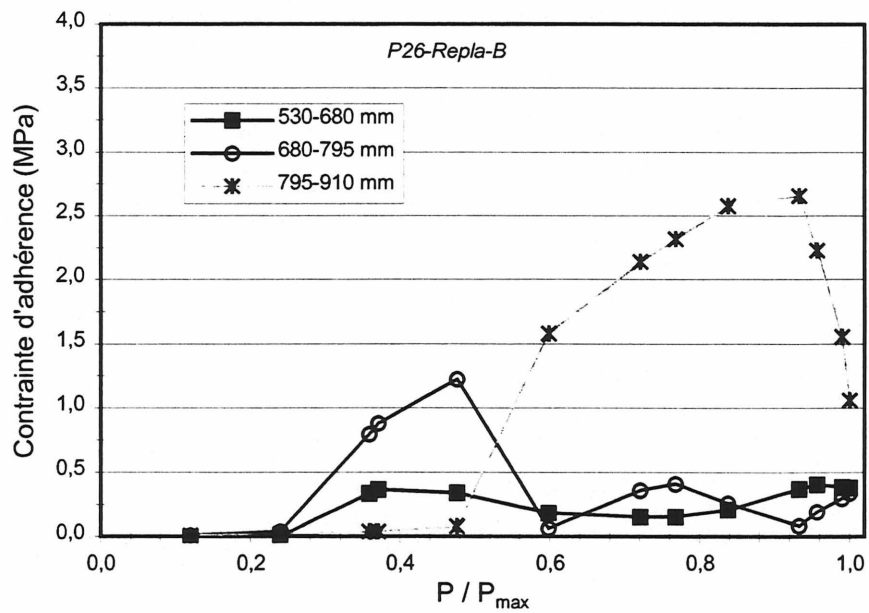
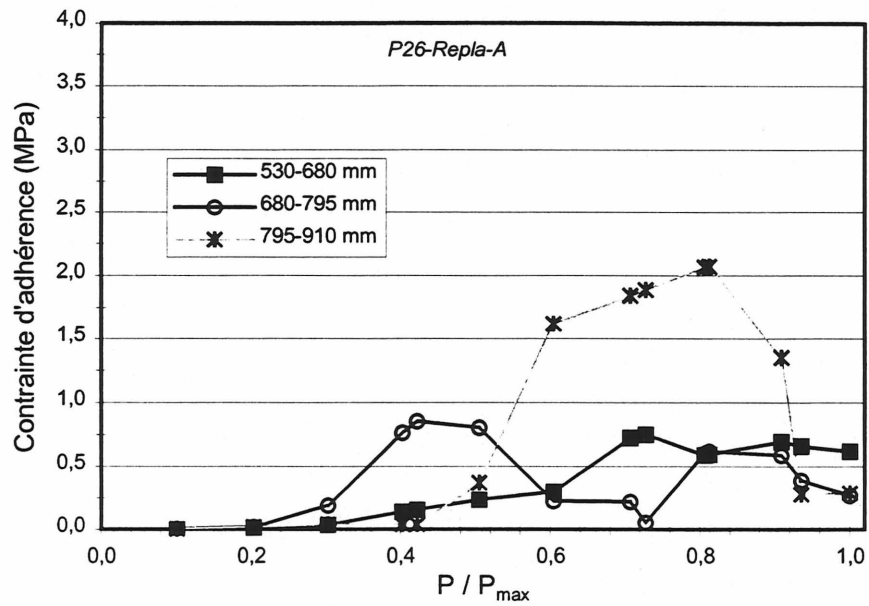


Figure C.16 - Contraite d'adhérence en fonction du niveau relatif du chargement des poutres avec le Replark 20 après 26 cycles de mouillage-séchage

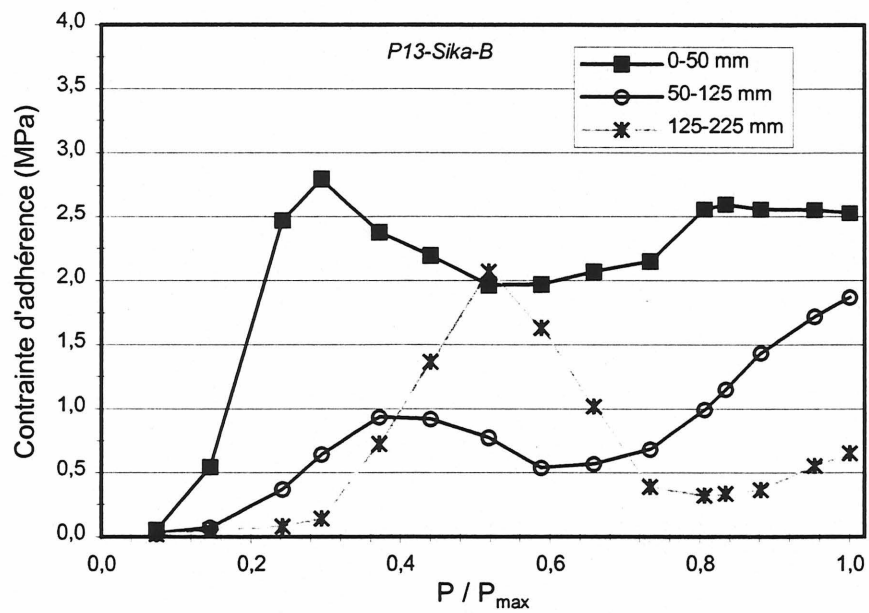
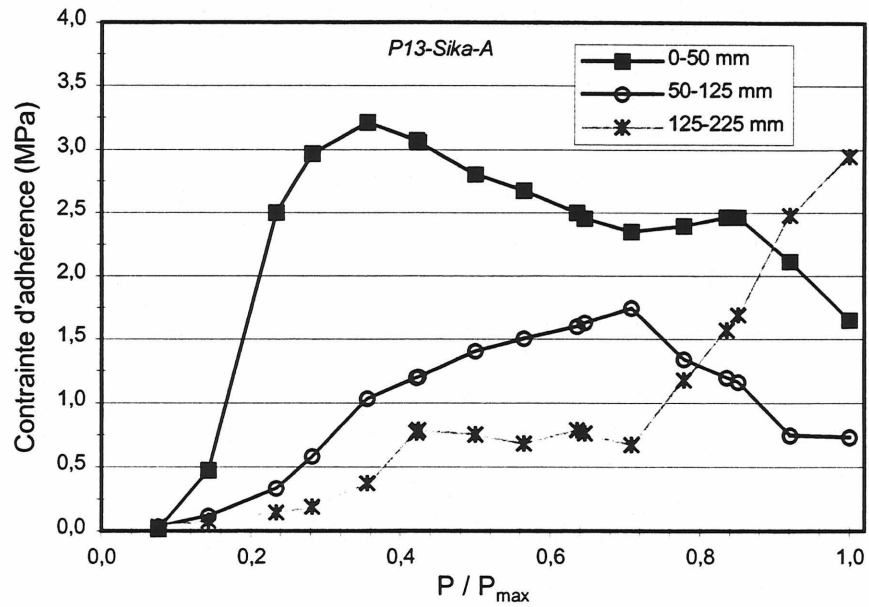


Figure C.17 - Contraite d'adhérence en fonction du niveau relatif du chargement des poutres avec le Carbodur S après 13 cycles de mouillage-séchage

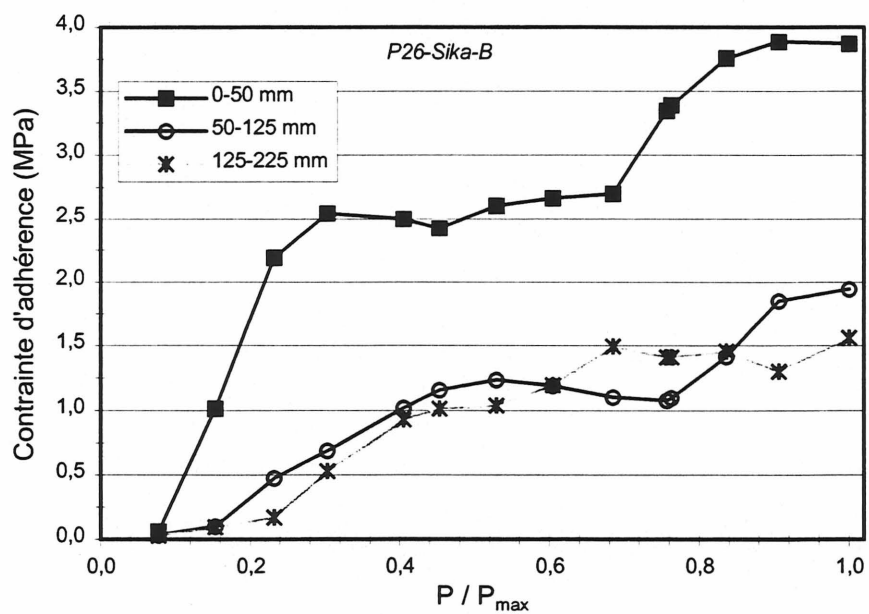
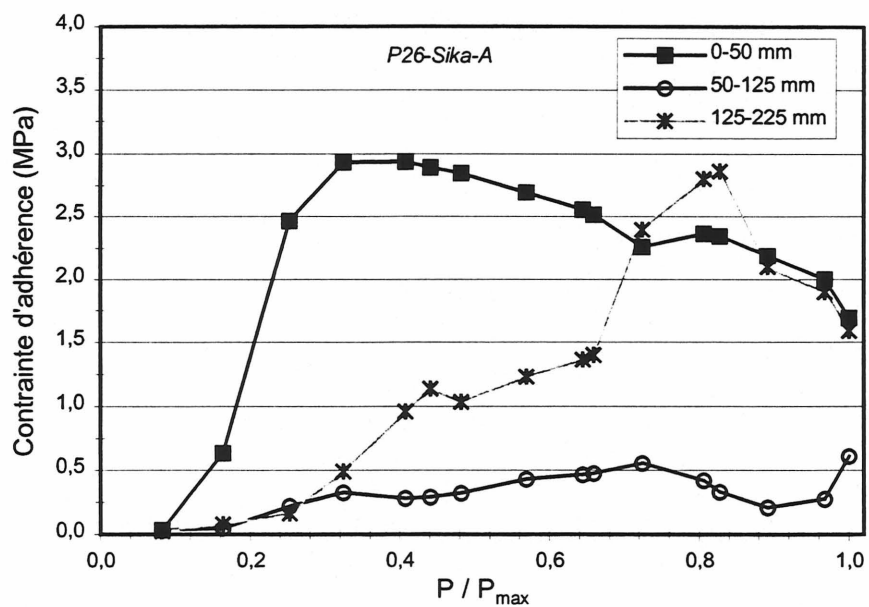


Figure C.18 - Contrainte d'adhérence en fonction du niveau relatif du chargement des poutres avec le Carbodur S après 26 cycles de mouillage-séchage

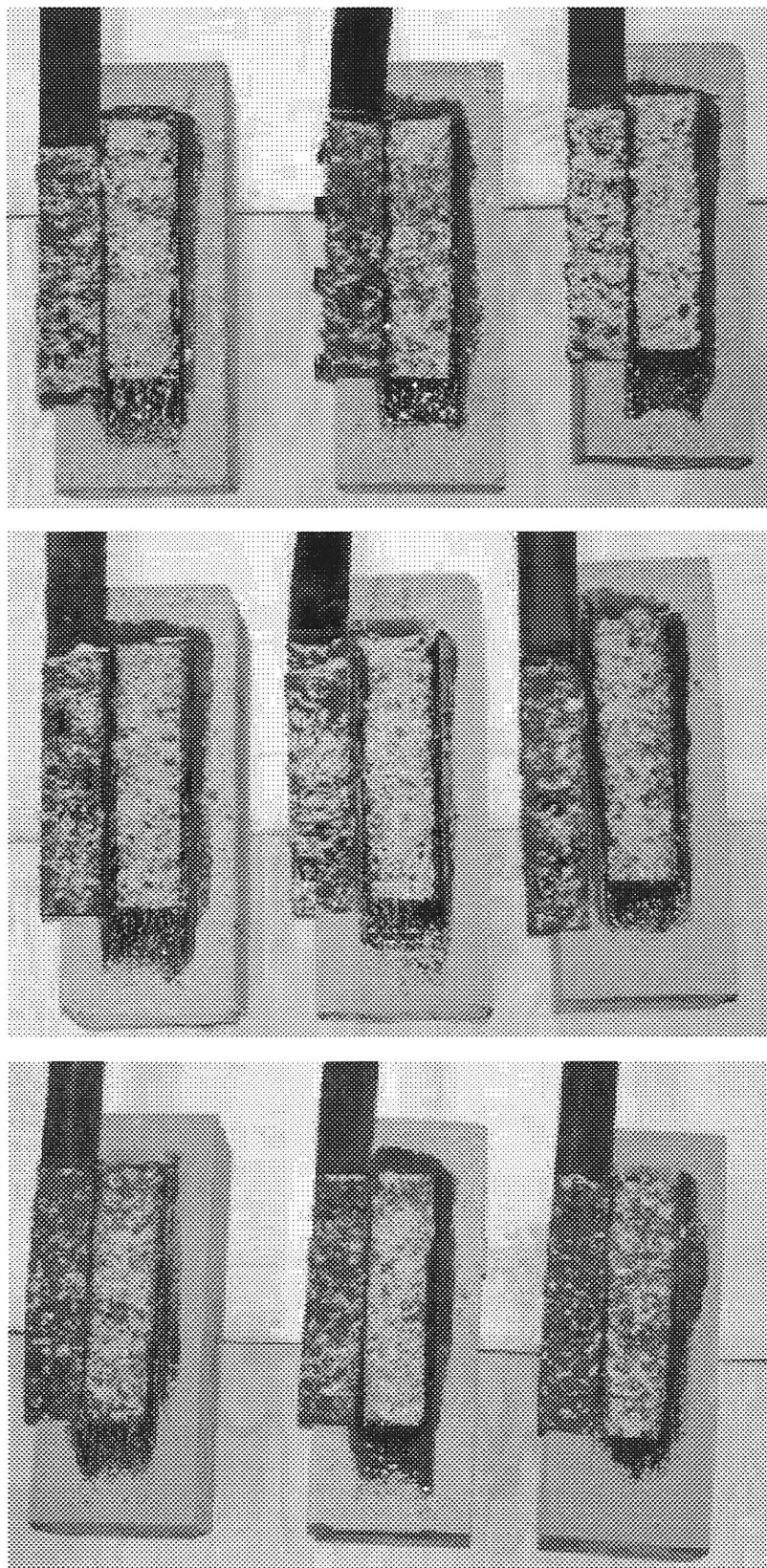


Figure C.19 - Mode de rupture des blocs avec le Replark 20 (de haut en bas) : 0, 13 et 26 cycles

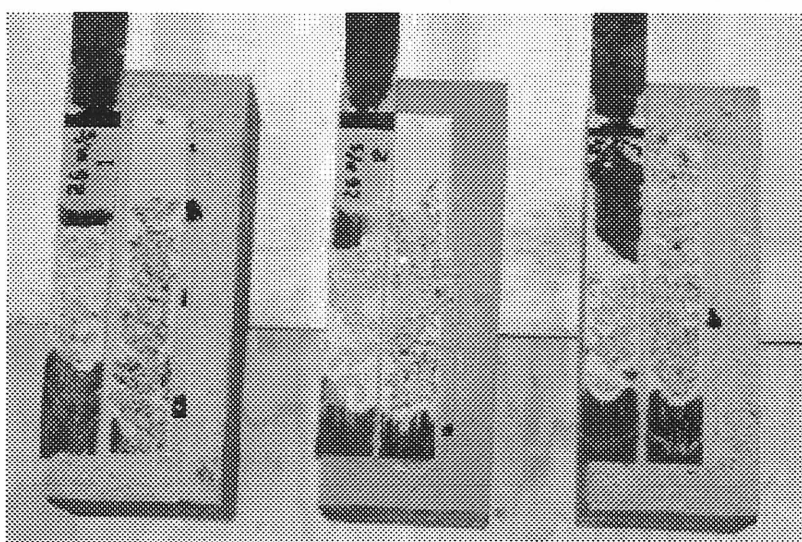
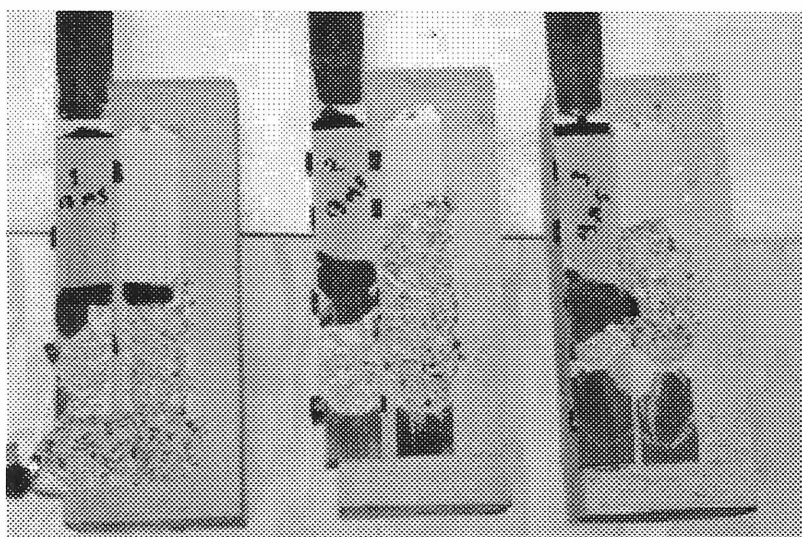
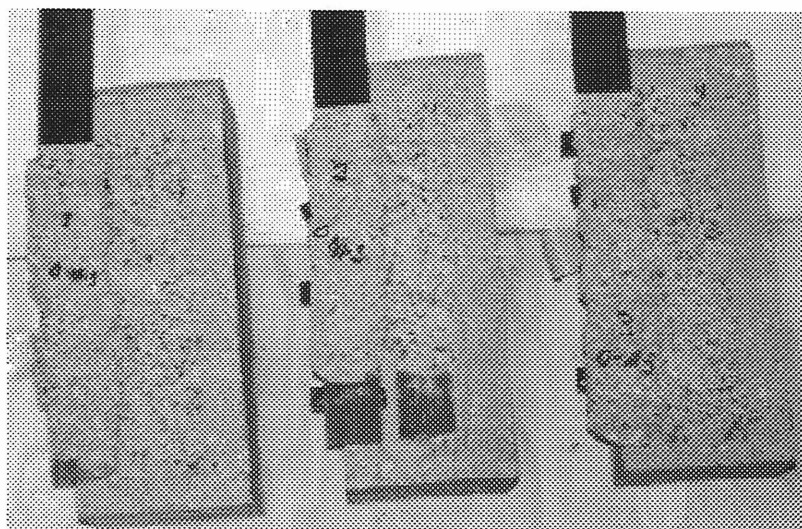


Figure C.20 - Mode de rupture des blocs avec le Carbodur S (de haut en bas) : 0, 13 et 26 cycles

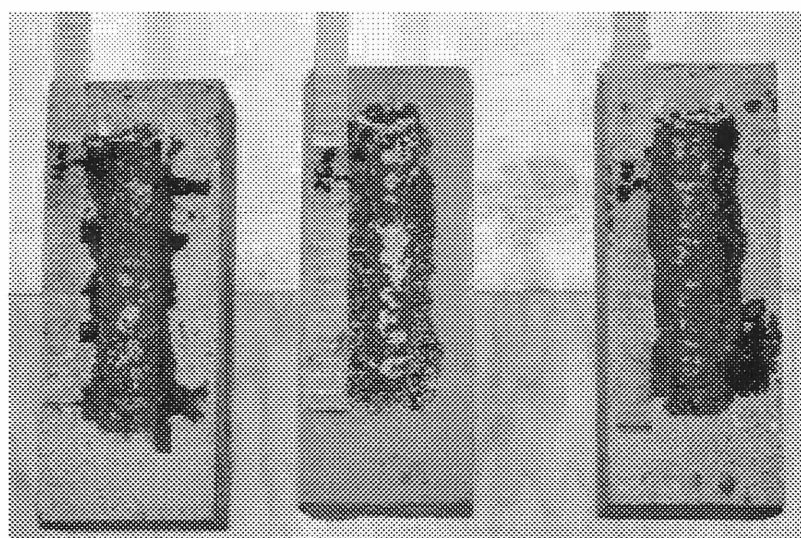
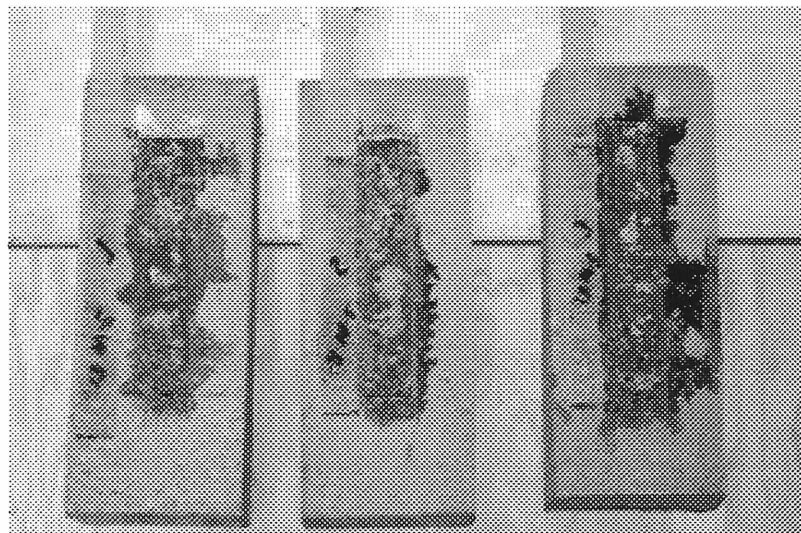
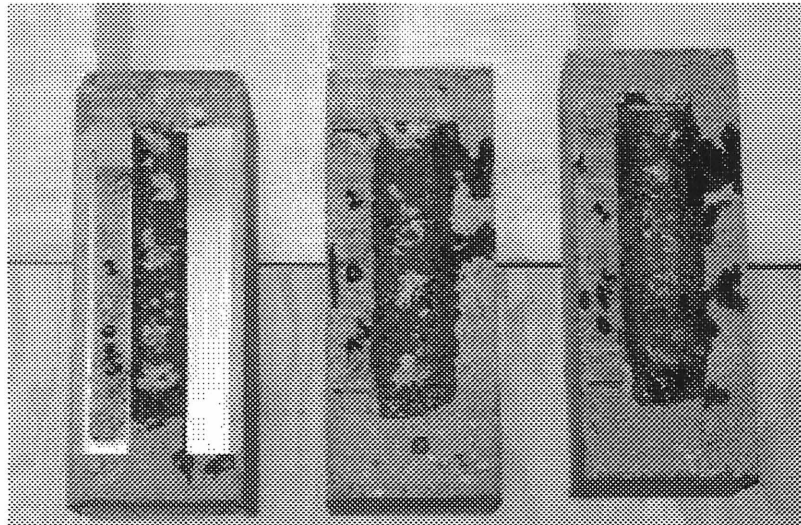


Figure C.21 - Mode de rupture des blocs avec le Fibrwrap (de haut en bas) : 0, 13 et 26 cycles

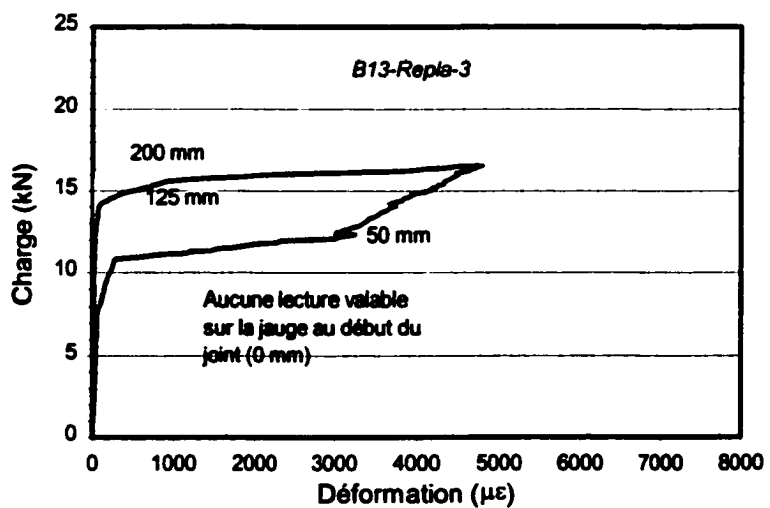
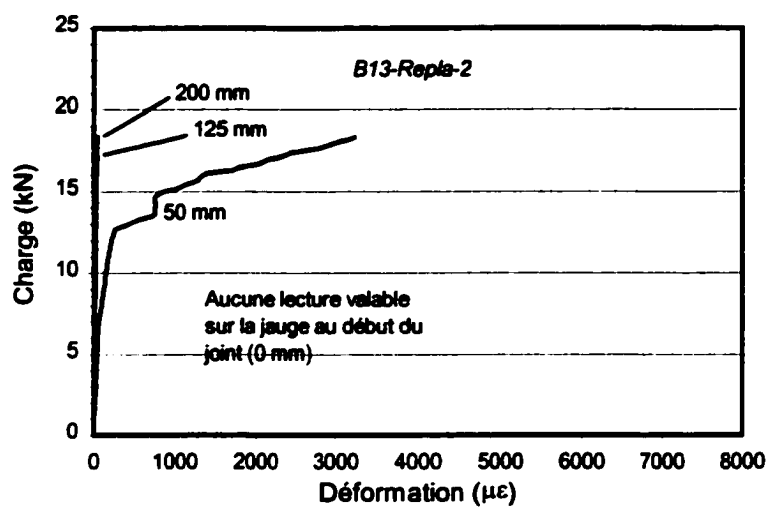
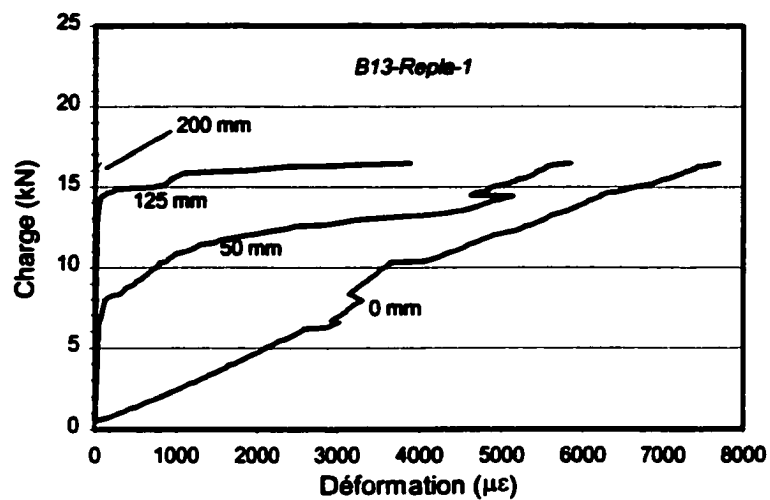


Figure C.22 - Charge appliquée et déformations du Replark 20 pour les blocs après 13 cycles

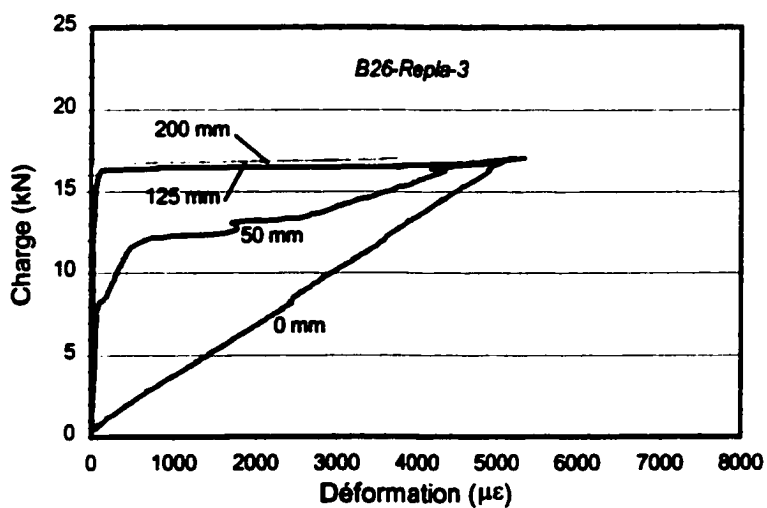
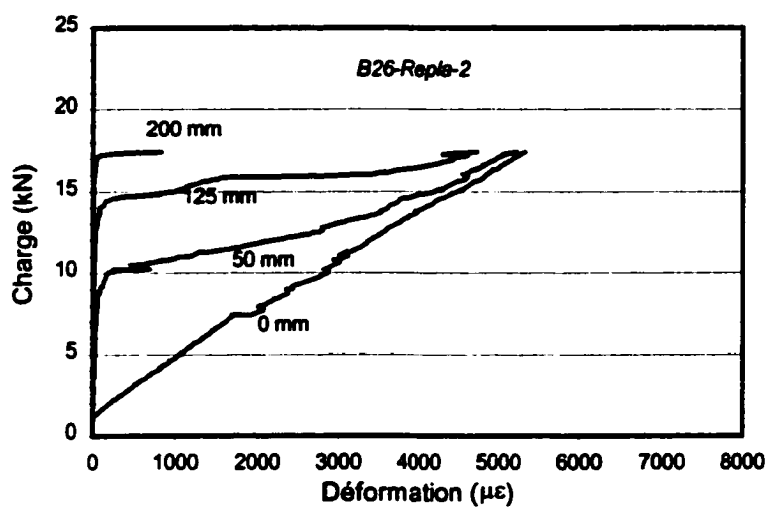
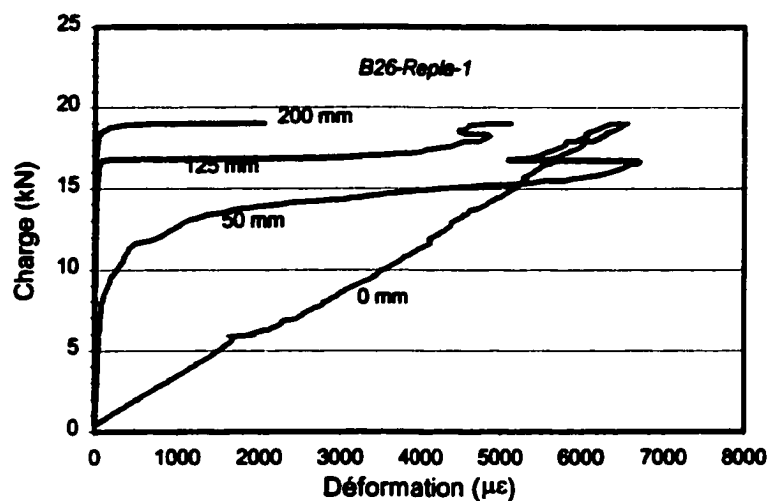


Figure C.23 - Charge appliquée et déformations du Replark 20 pour les blocs après 26 cycles

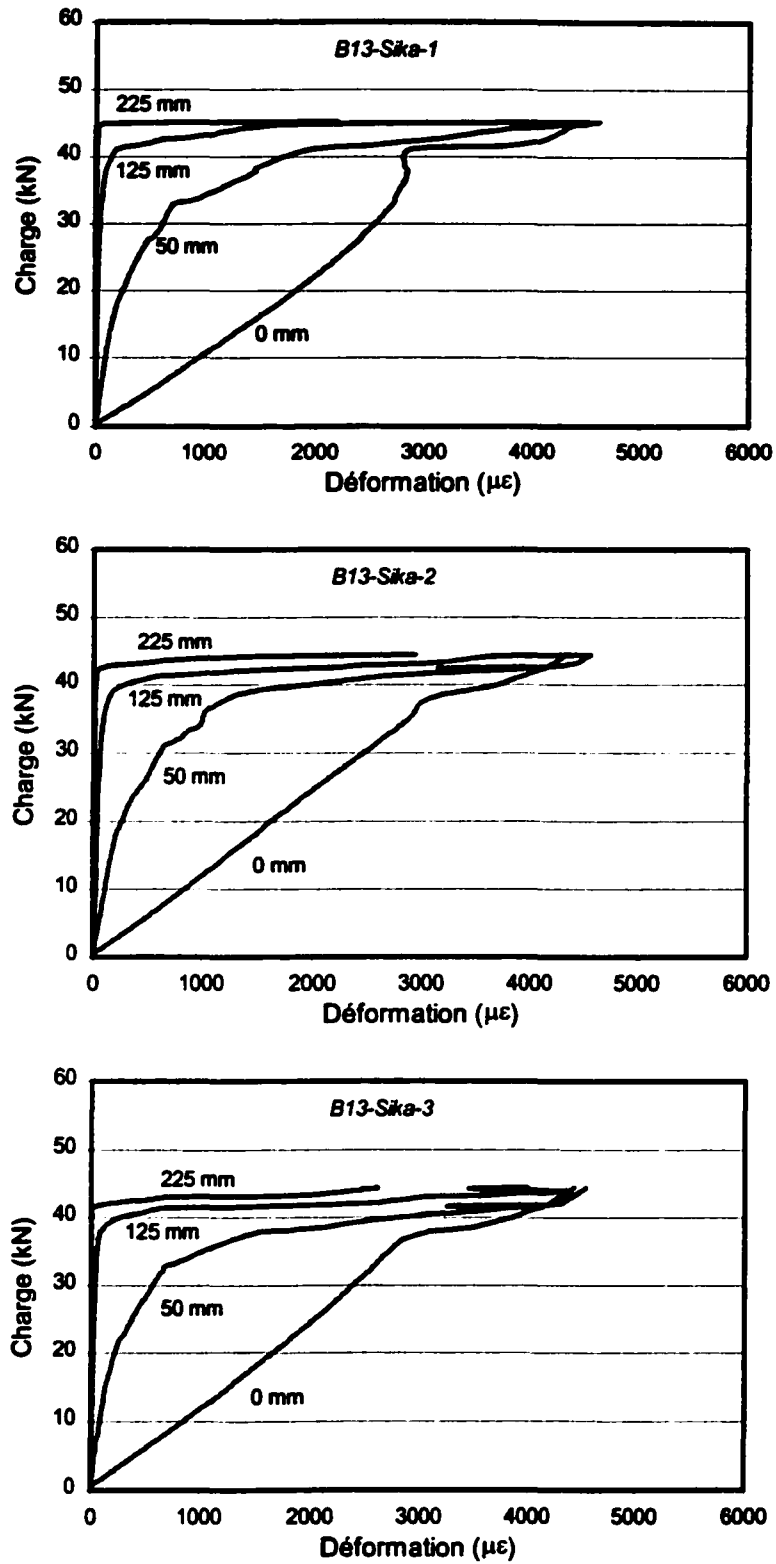


Figure C.24 - Charge appliquée et déformations du Carbodur S pour les blocs après 13 cycles

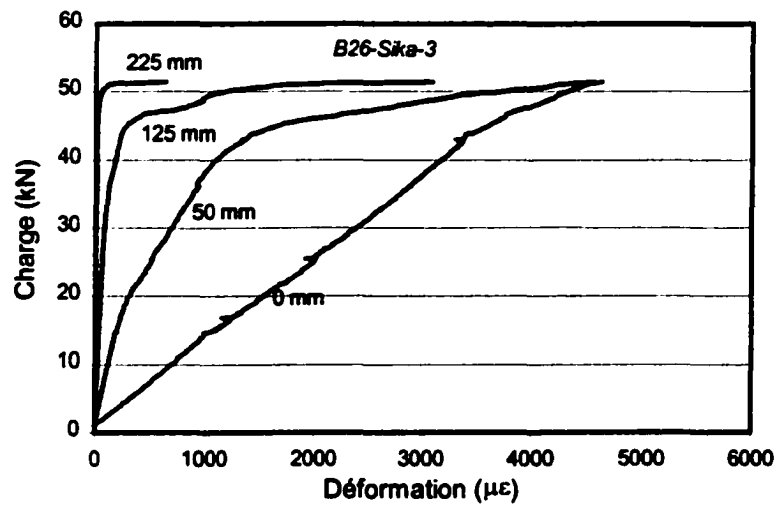
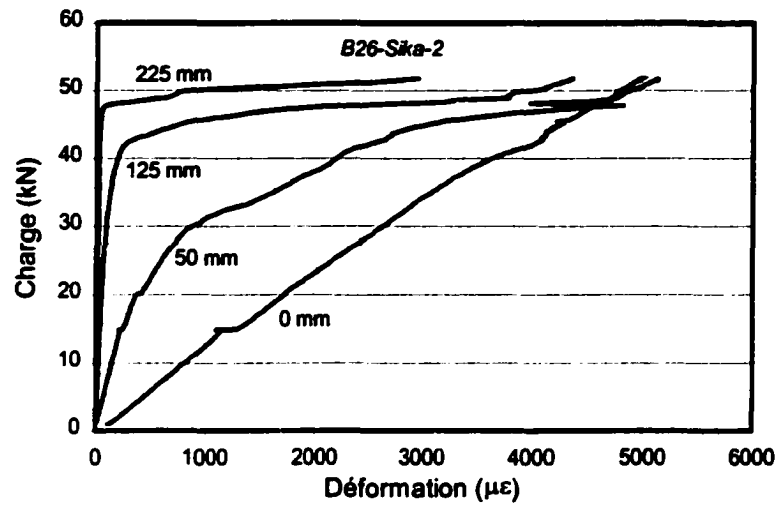
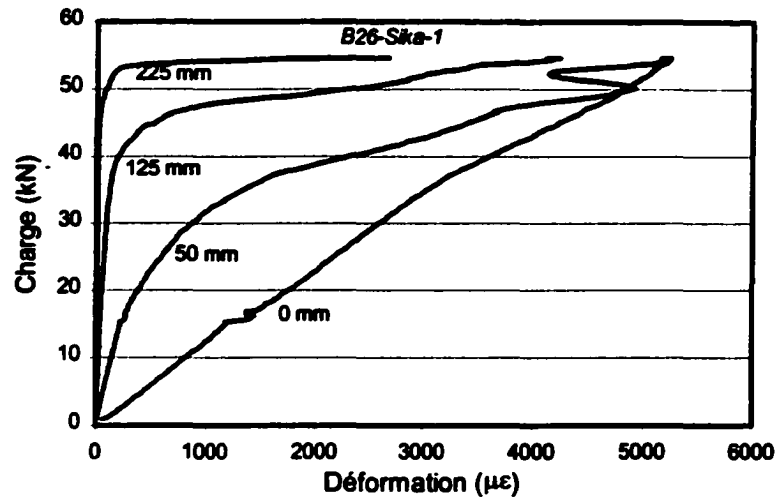


Figure C.25 - Charge appliquée et déformations du Carbodur S pour les blocs après 26 cycles

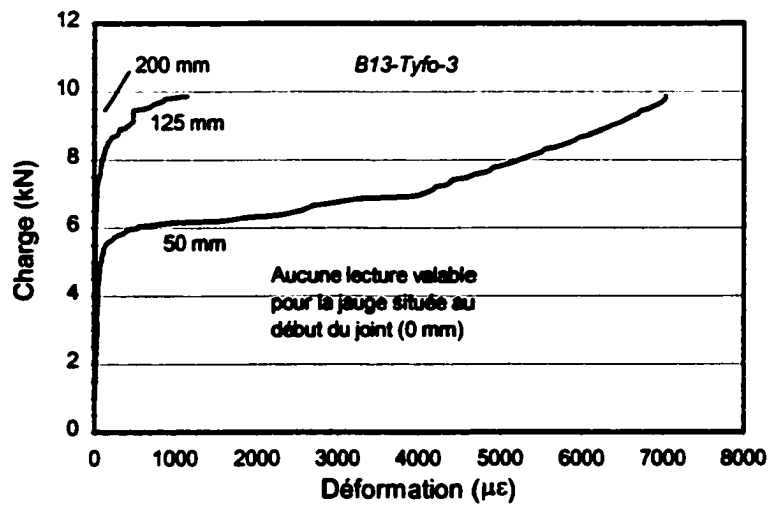
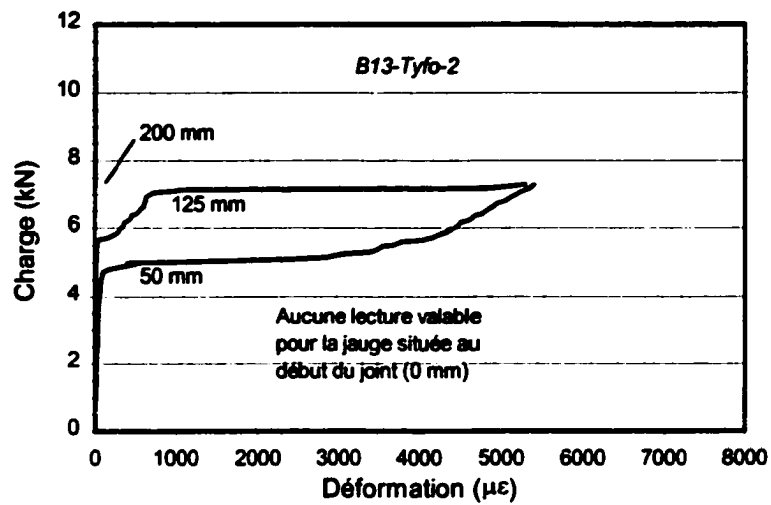
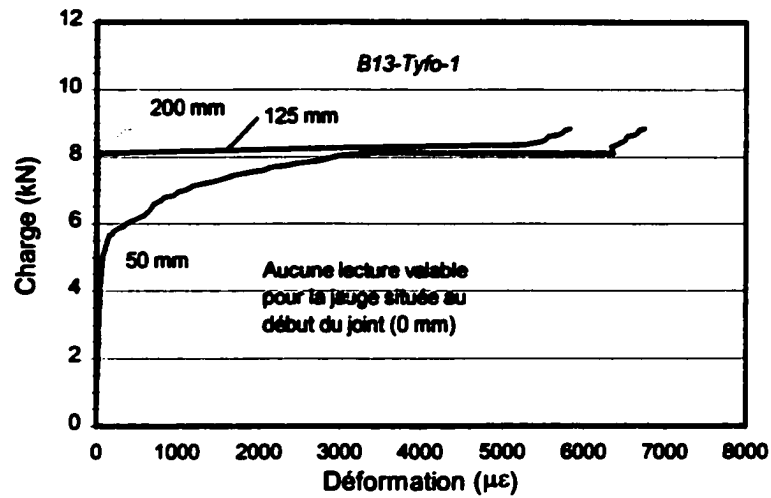


Figure C.26 - Charge appliquée et déformations du Fibrwrap pour les blocs après 13 cycles

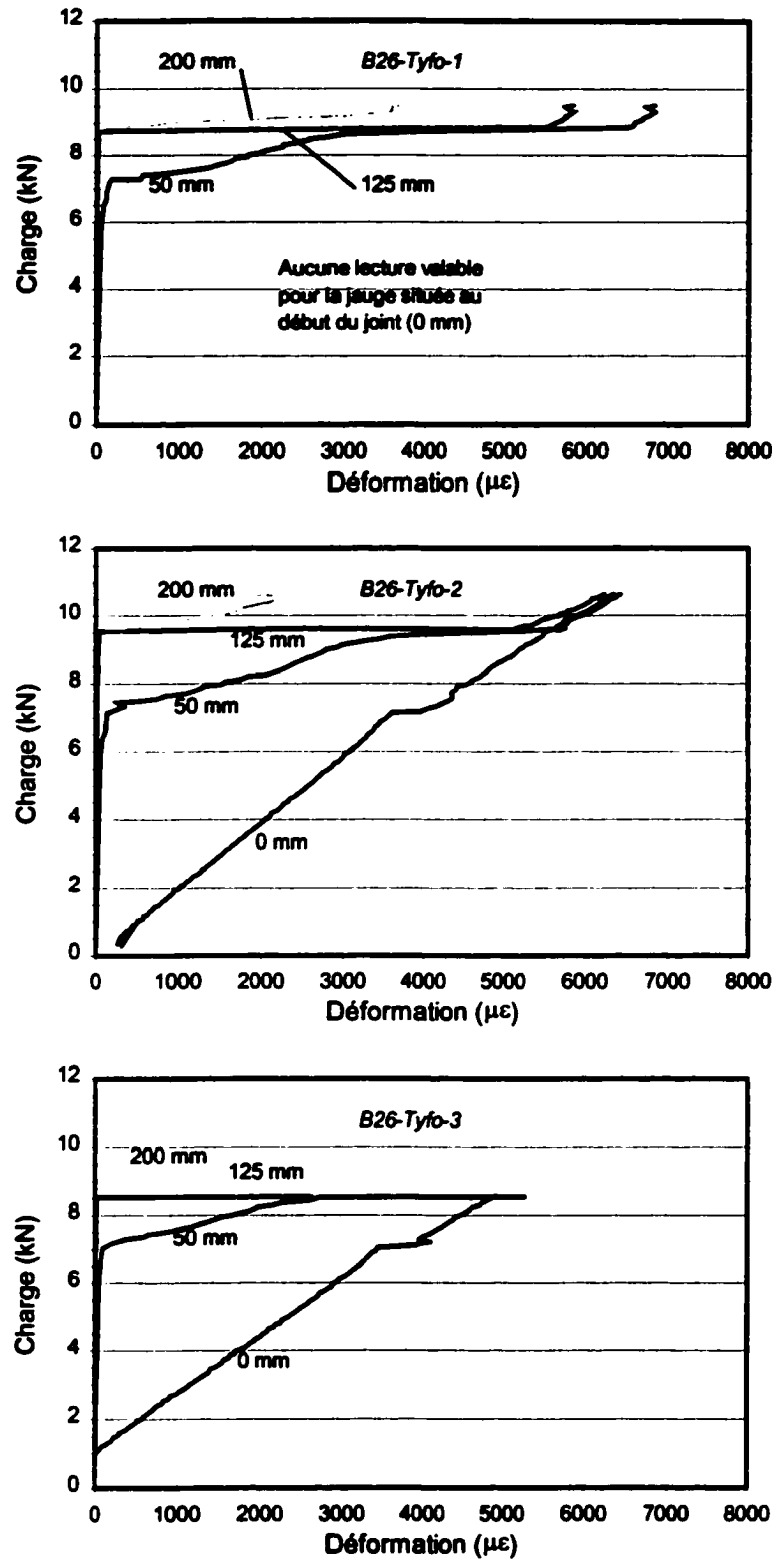


Figure C.27 - Charge appliquée et déformations du Fibrwrap pour les blocs après 26 cycles

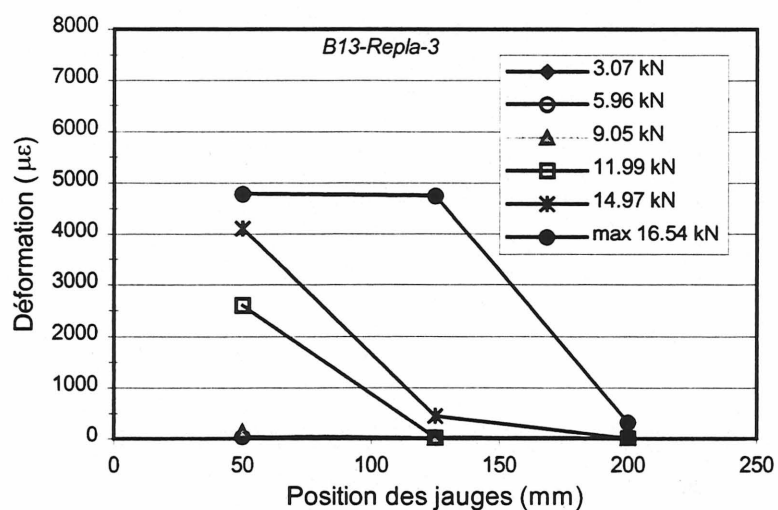
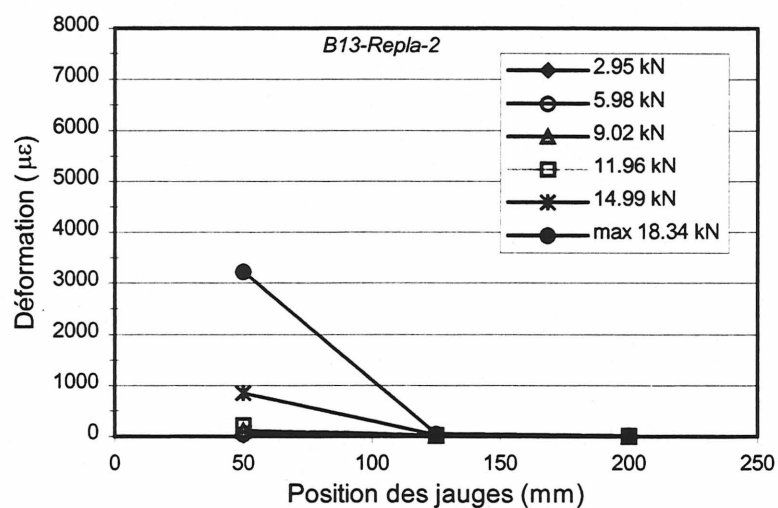
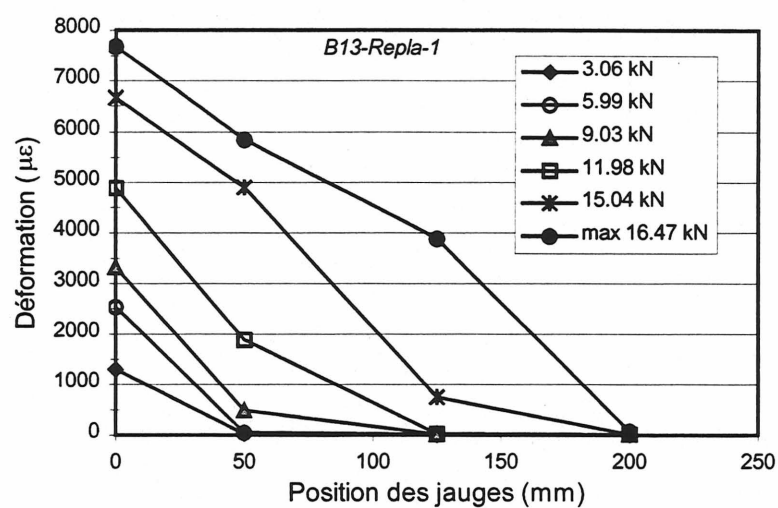


Figure C.28 - Profil des déformations le long du Replak 20 pour les blocs après 13 cycles de mouillage-séchage en fonction de la charge appliquée

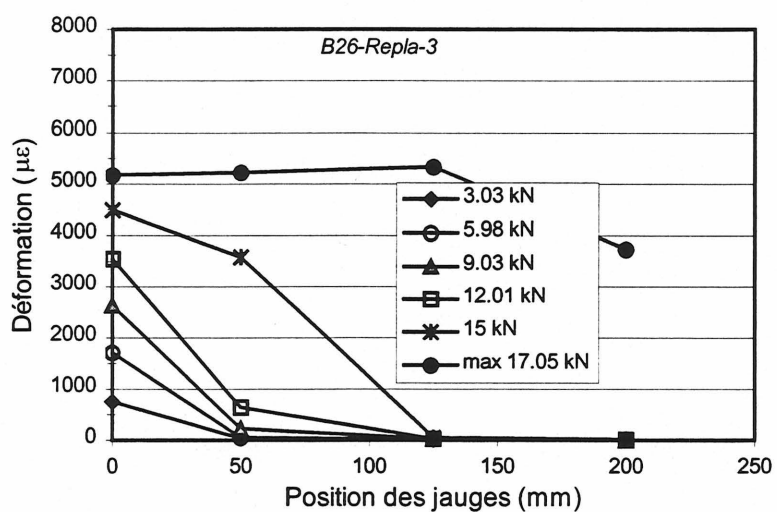
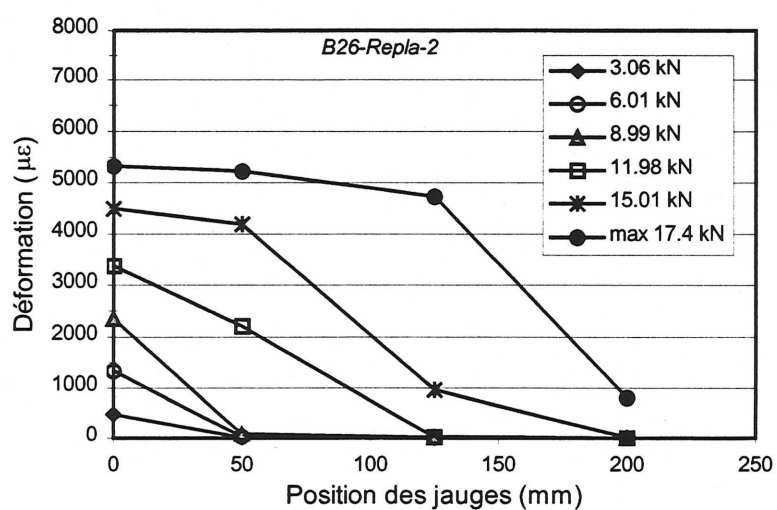
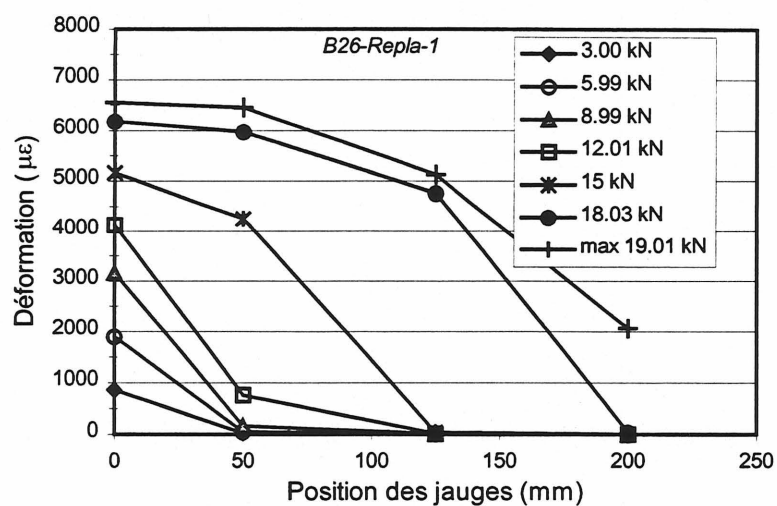


Figure C.29 - Profil des déformations le long du Replark 20 pour les blocs après 26 cycles de mouillage-séchage en fonction de la charge appliquée

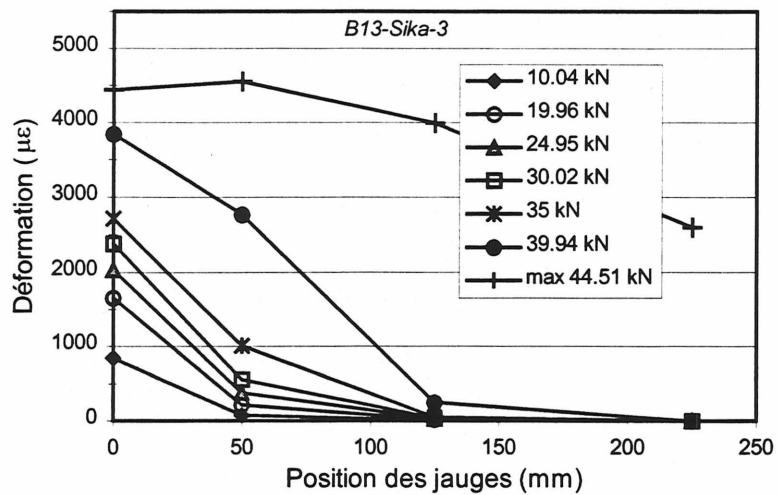
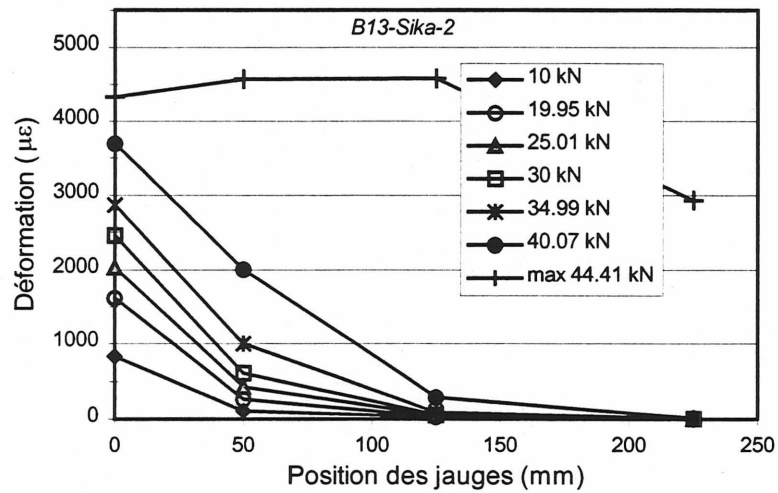
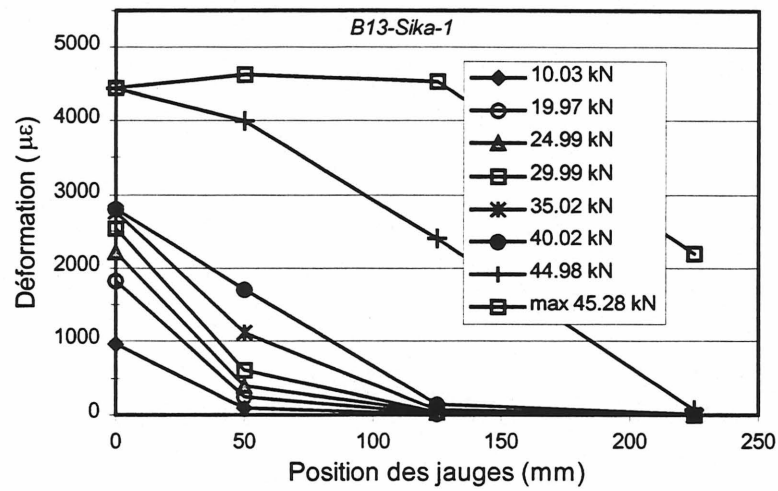


Figure C.30 - Profil des déformations le long du Carbodur S pour les blocs après 13 cycles de mouillage-séchage en fonction de la charge appliquée

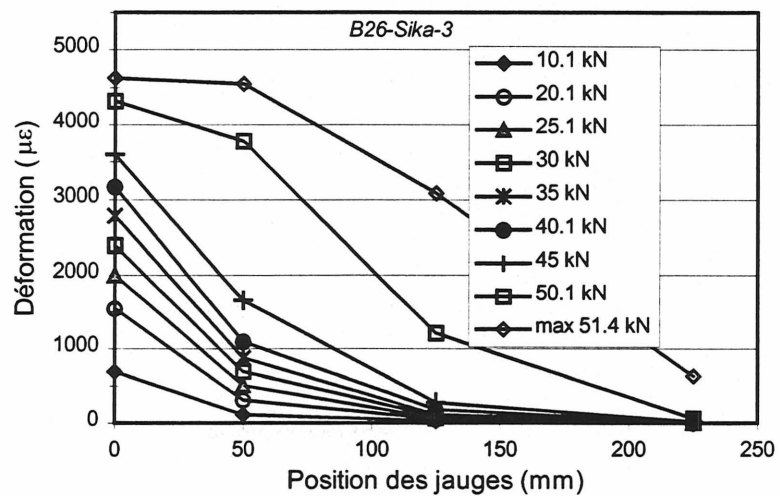
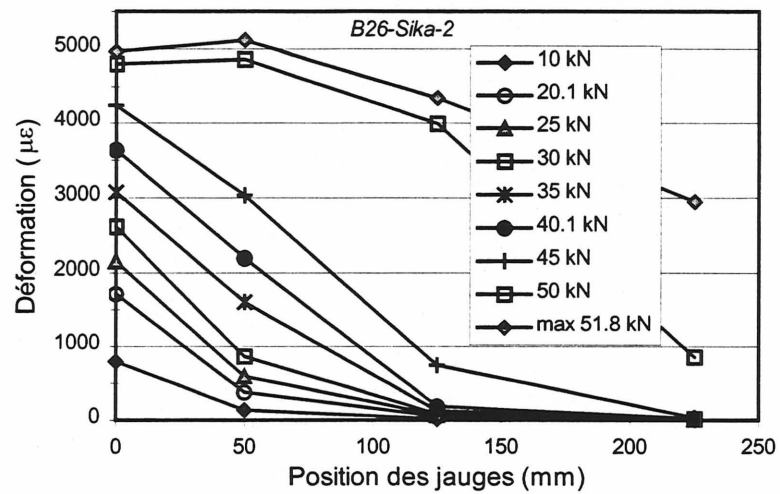
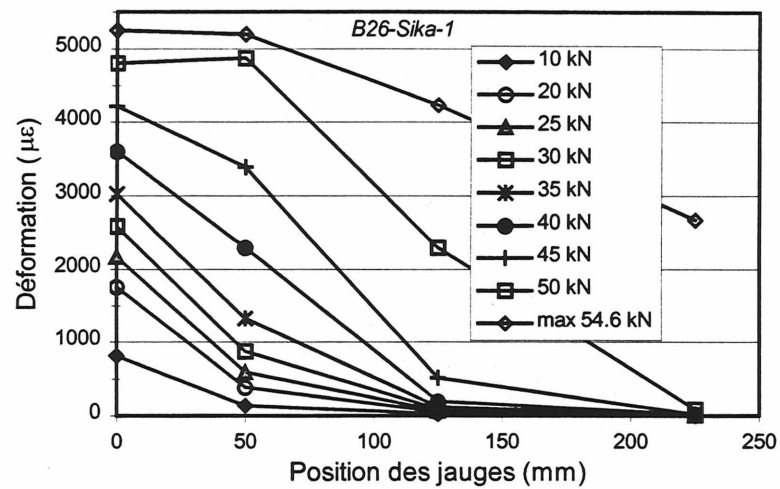


Figure C.31 - Profil des déformations le long du Carבודur S pour les blocs après 26 cycles de mouillage-séchage en fonction de la charge appliquée

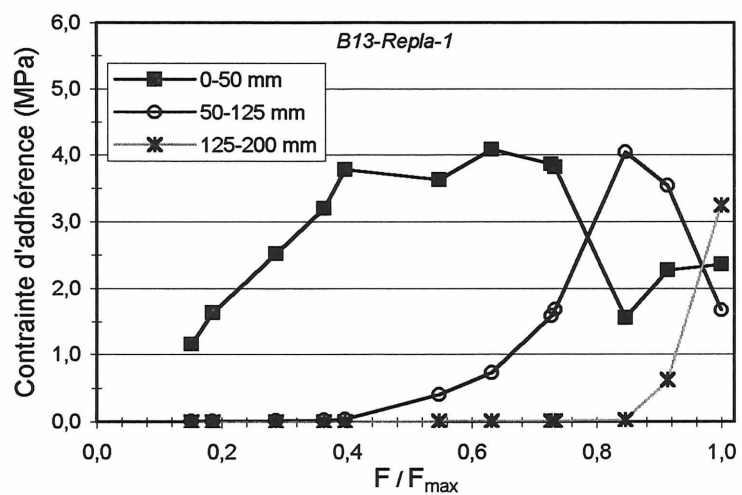


Figure C.32 - Contrainte d'adhérence en fonction du niveau relatif du chargement des blocs avec le Replark 20 après 13 cycles de mouillage-séchage

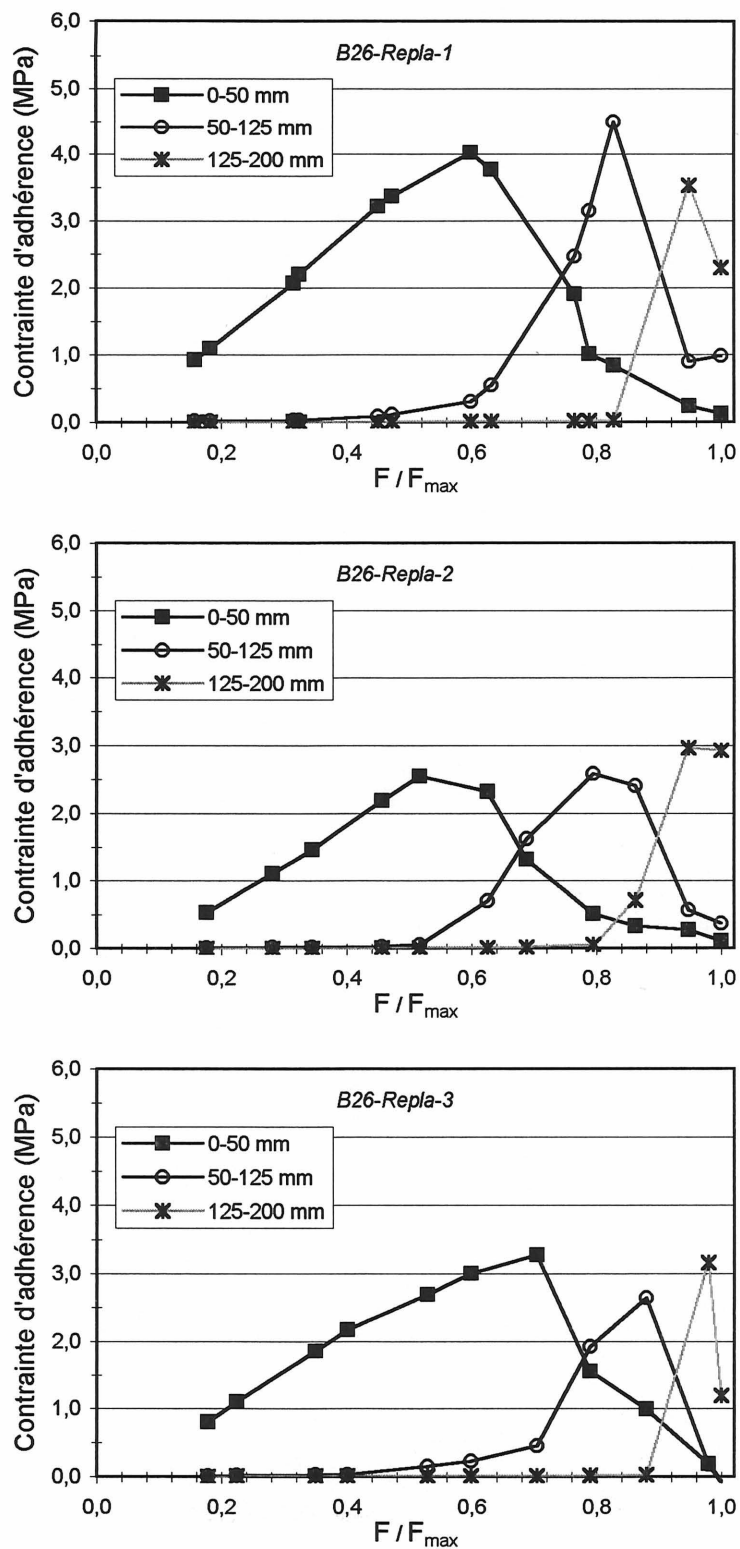


Figure C.33 - Contrainte d'adhérence en fonction du niveau relatif du chargement des blocs avec le Replark 20 après 26 cycles de mouillage-séchage

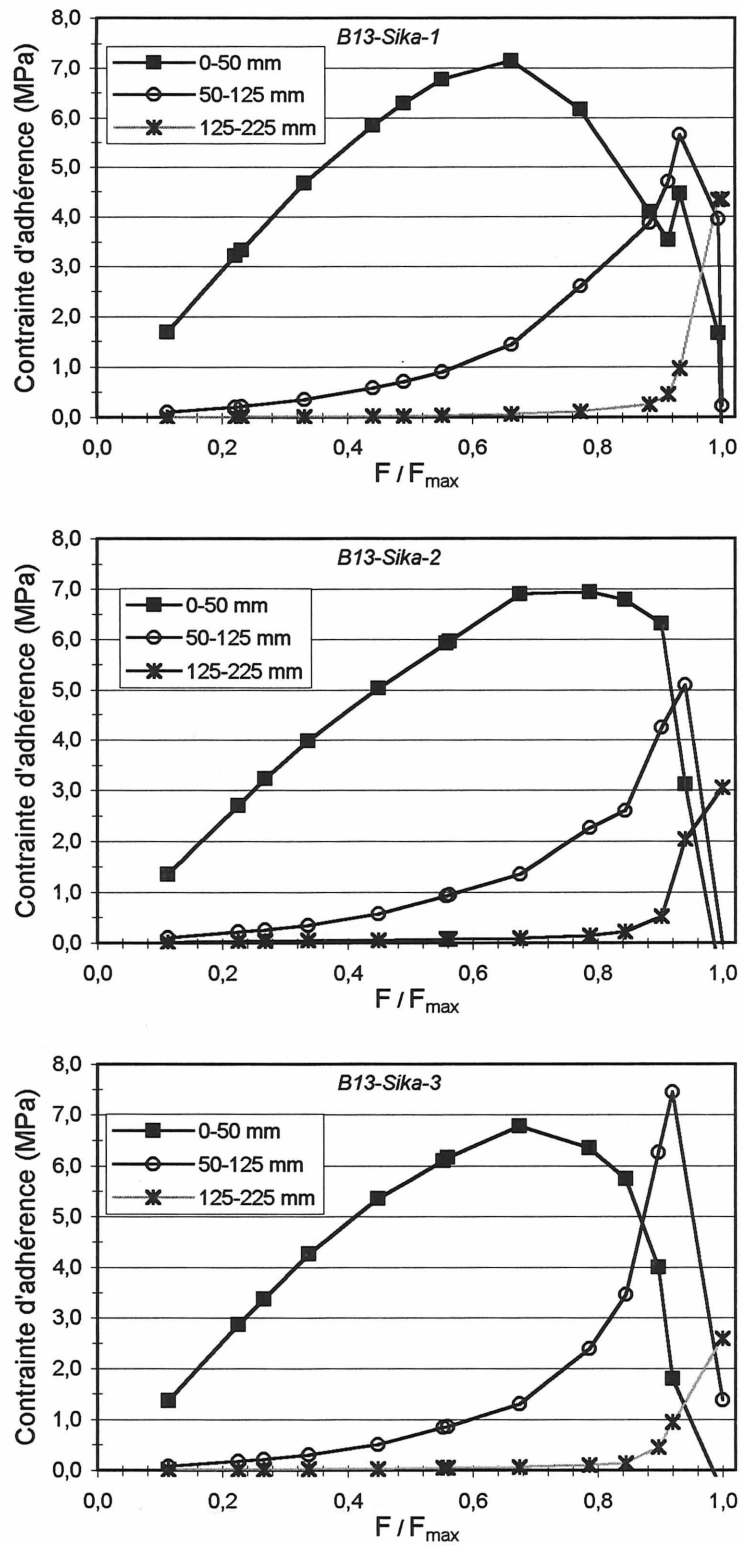


Figure C.34 - Contrainte d'adhérence en fonction du niveau relatif du chargement des blocs avec le Carbodur S après 13 cycles de mouillage-séchage

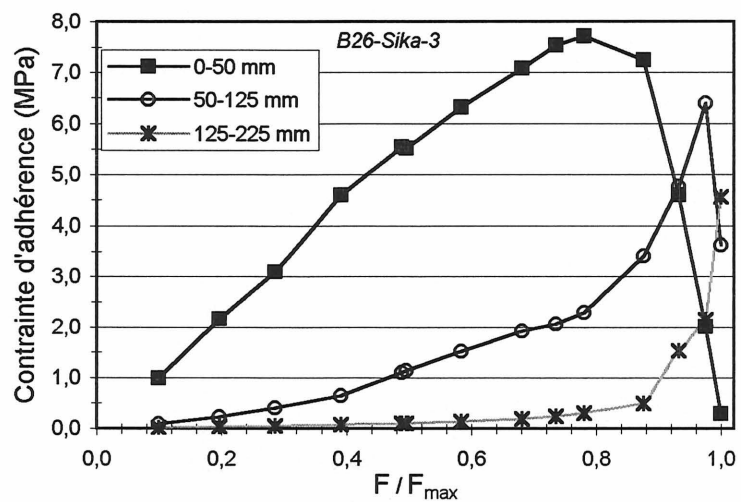
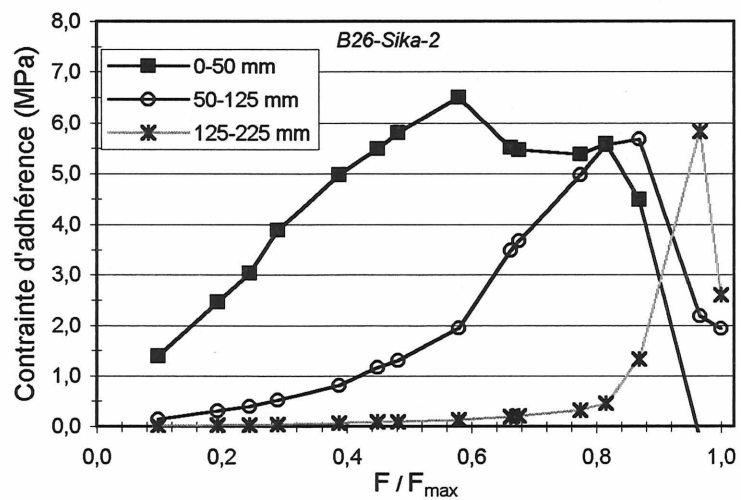
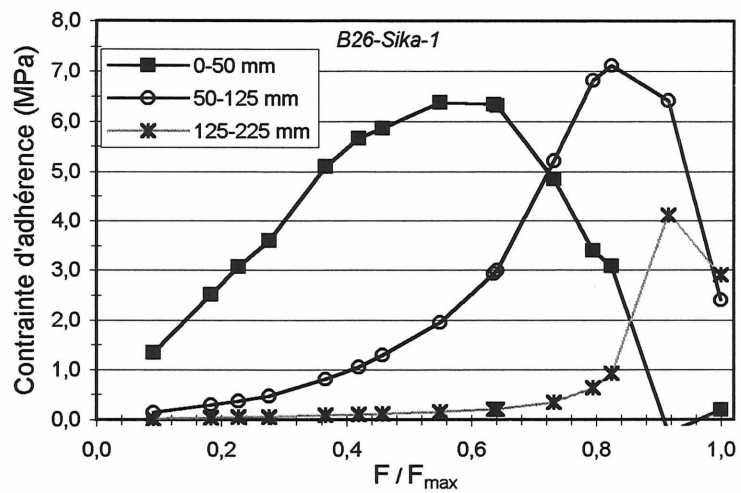


Figure C.35 - Contraite d'adhérence en fonction du niveau relatif du chargement des blocs avec le Carbodur S après 26 cycles de mouillage-séchage

Annexe D

RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES SUR LES EFFETS DES CYCLES DE GEL-DÉGEL

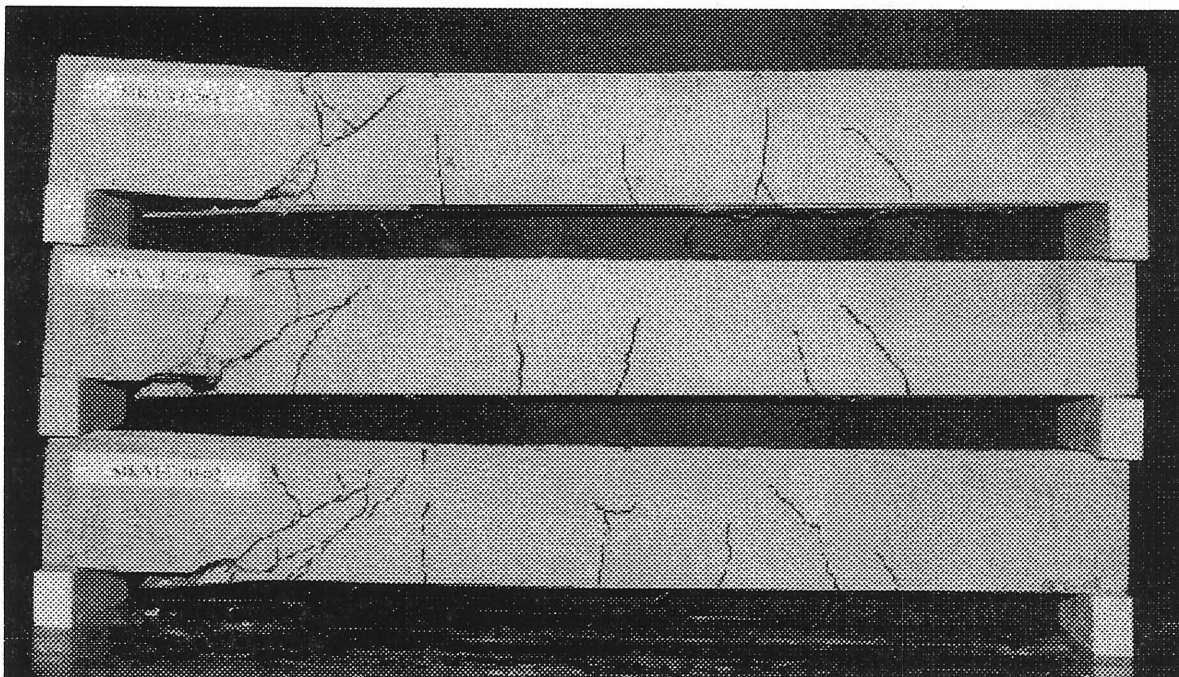


Figure D.1 - Mode de rupture des poutres (de haut en bas) : P0-Sika-1, P50-Sika-1 et 2

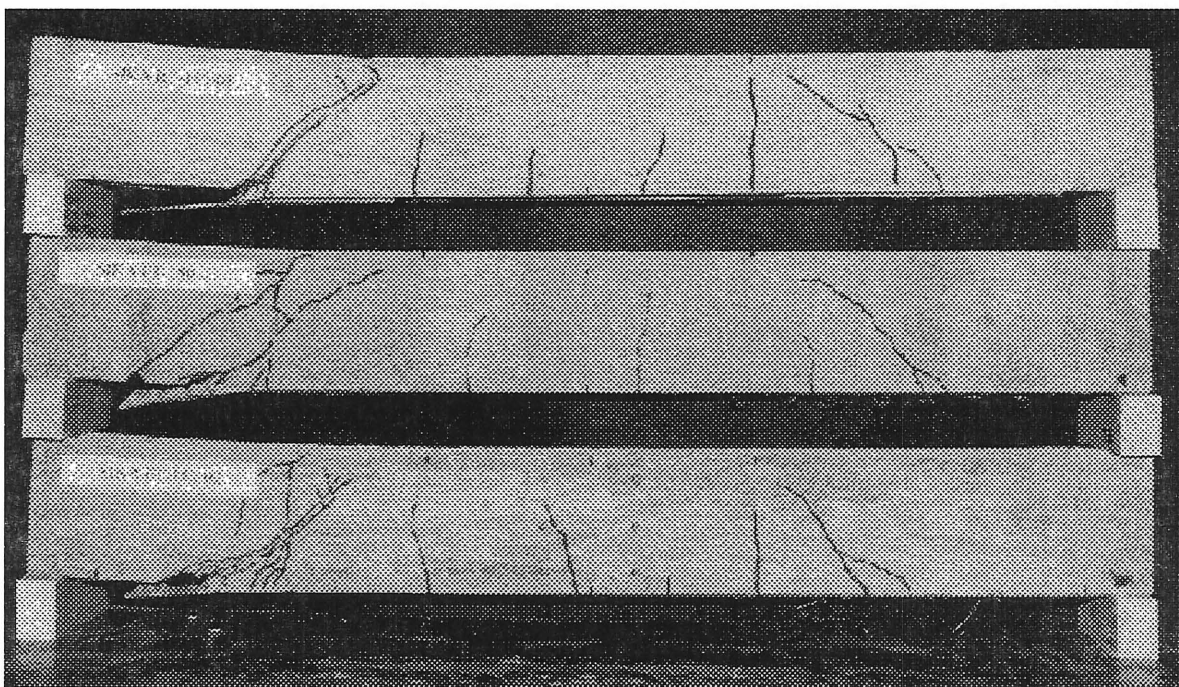


Figure D.2 - Mode de rupture des poutres (de haut en bas) : P0-Sika-2, P150-Sika-1 et 2

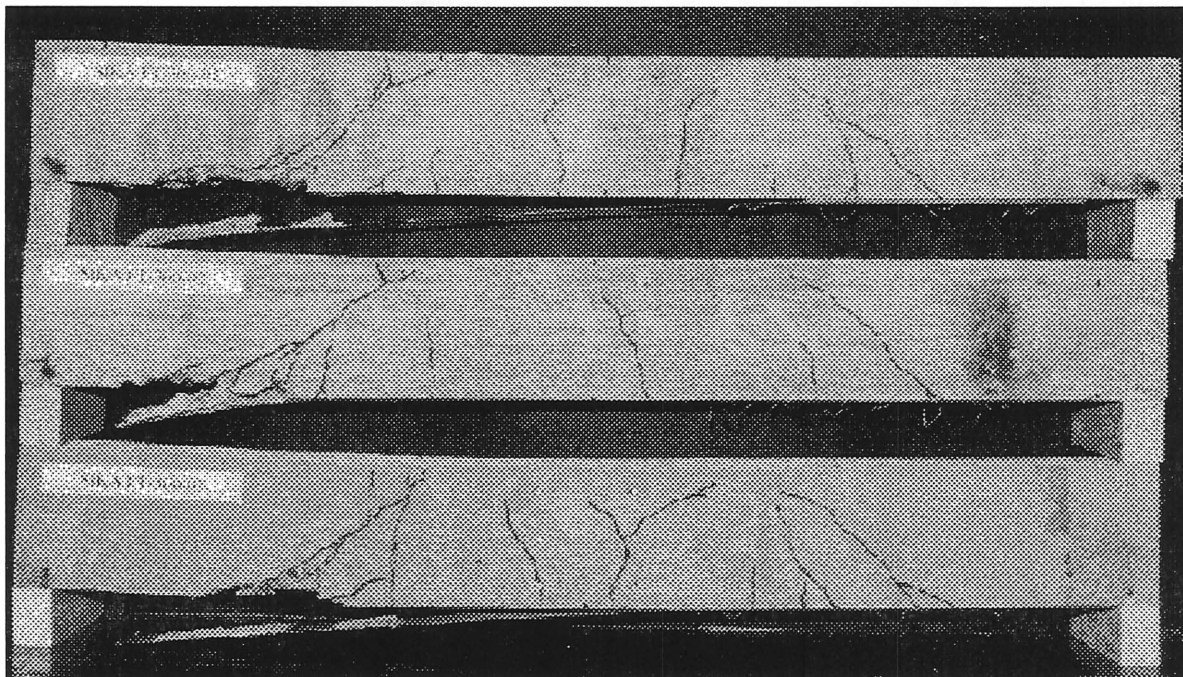


Figure D.3 - Mode de rupture des poutres (de haut en bas) : P300-Sika-1,2 et 3

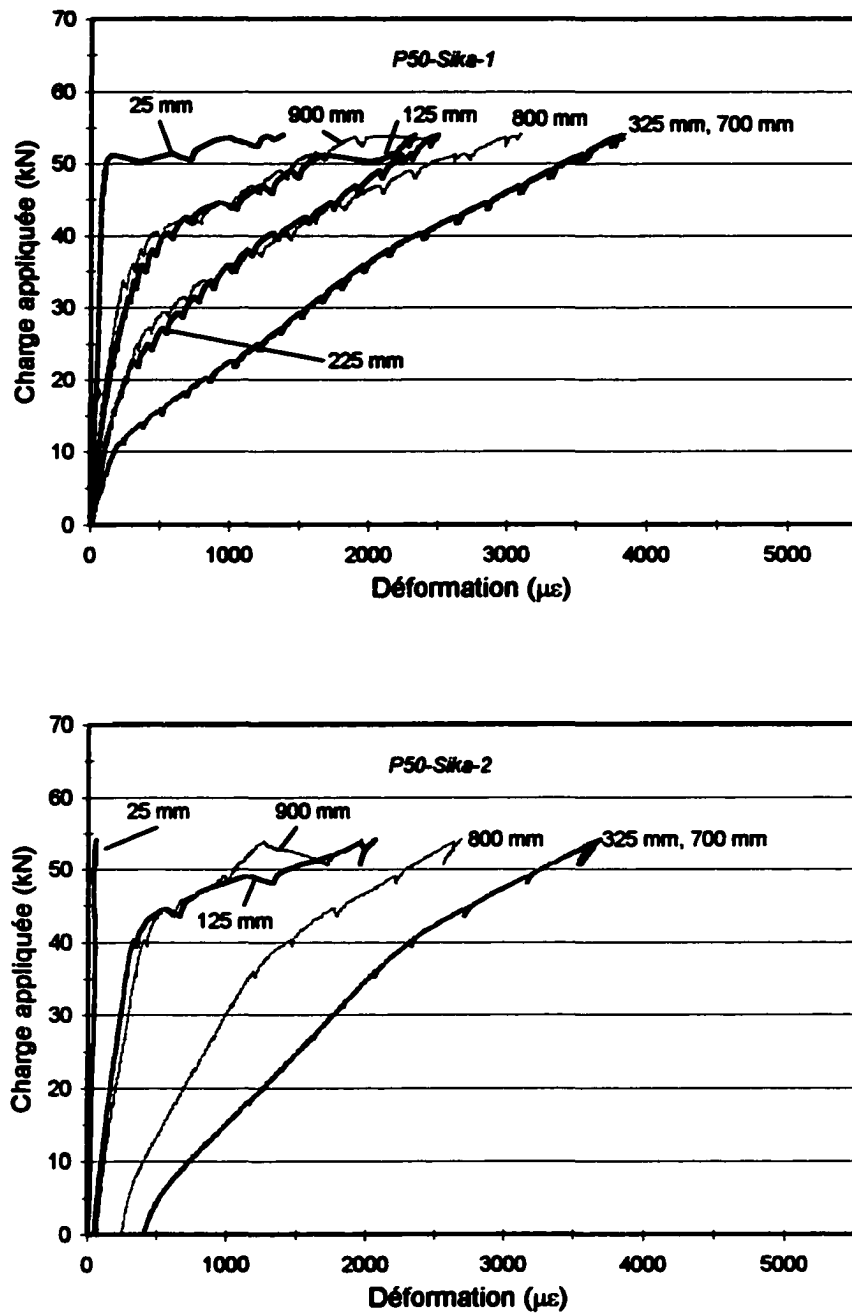


Figure D.4 - Charge appliquée et déformations du Carbodur S sur les poutres après 50 cycles de gel-dégel

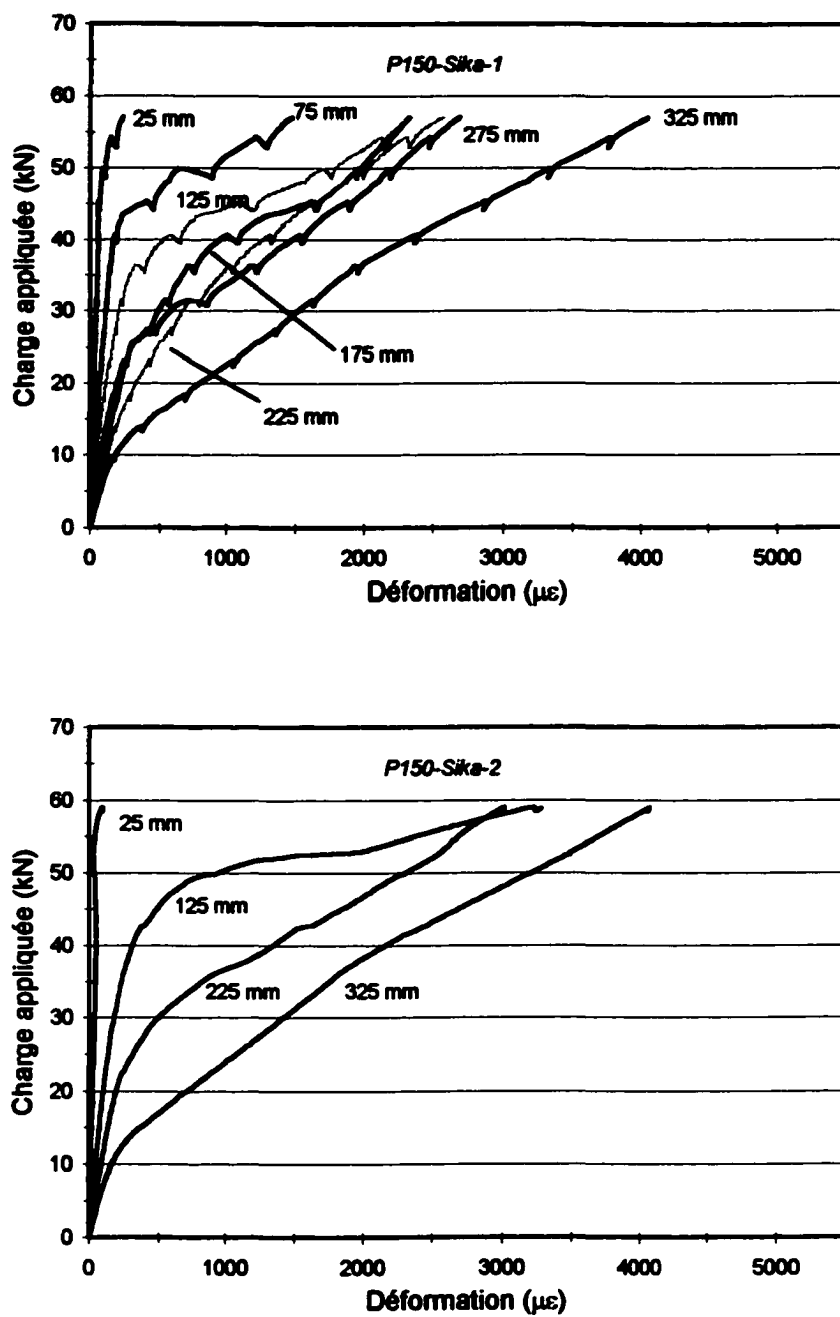


Figure D.5 - Charge appliquée et déformations du Carbodur S sur les poutres après 150 cycles de gel-dégel

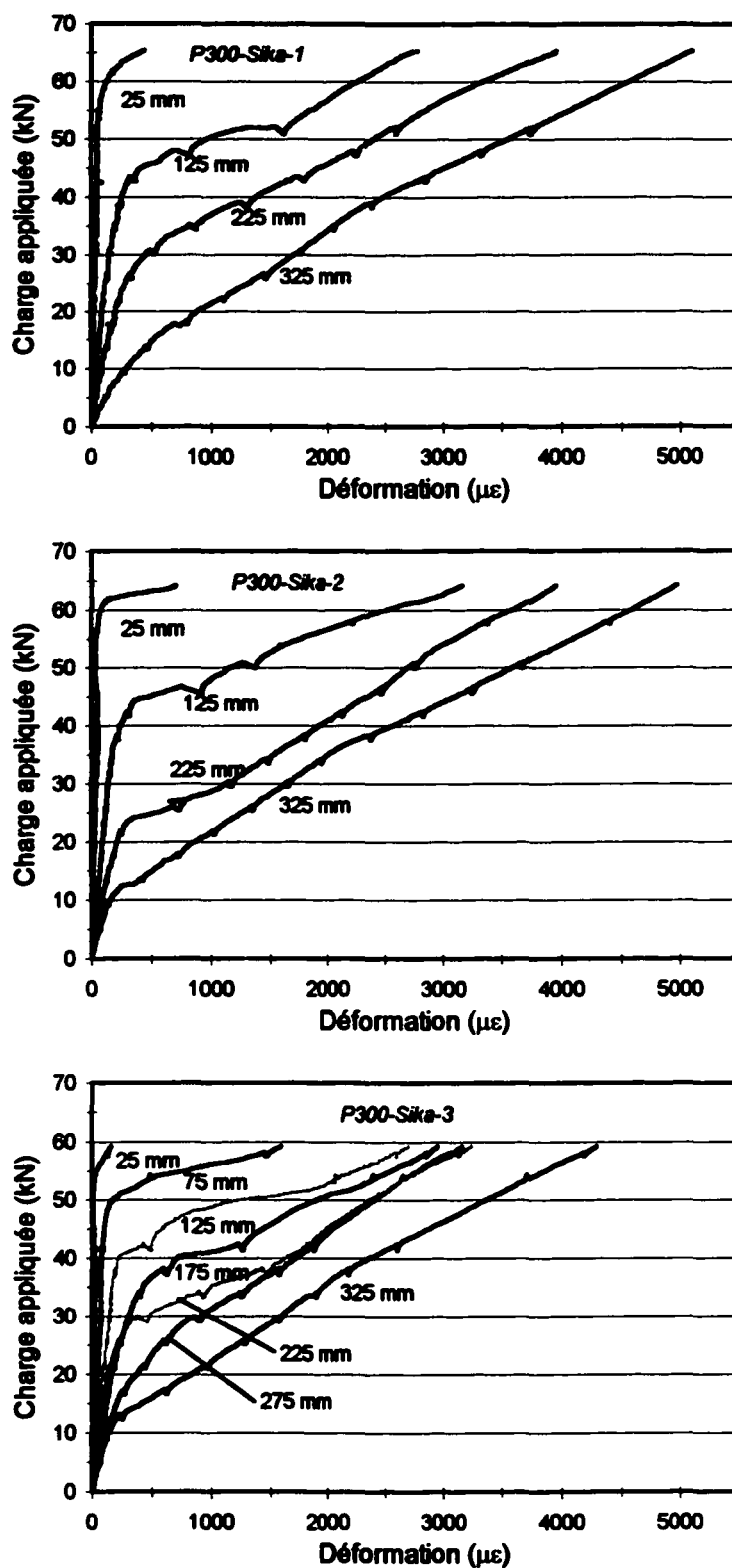


Figure D.6 - Charge appliquée et déformations du Carbodur S sur les poutres après 300 cycles de gel-dégel

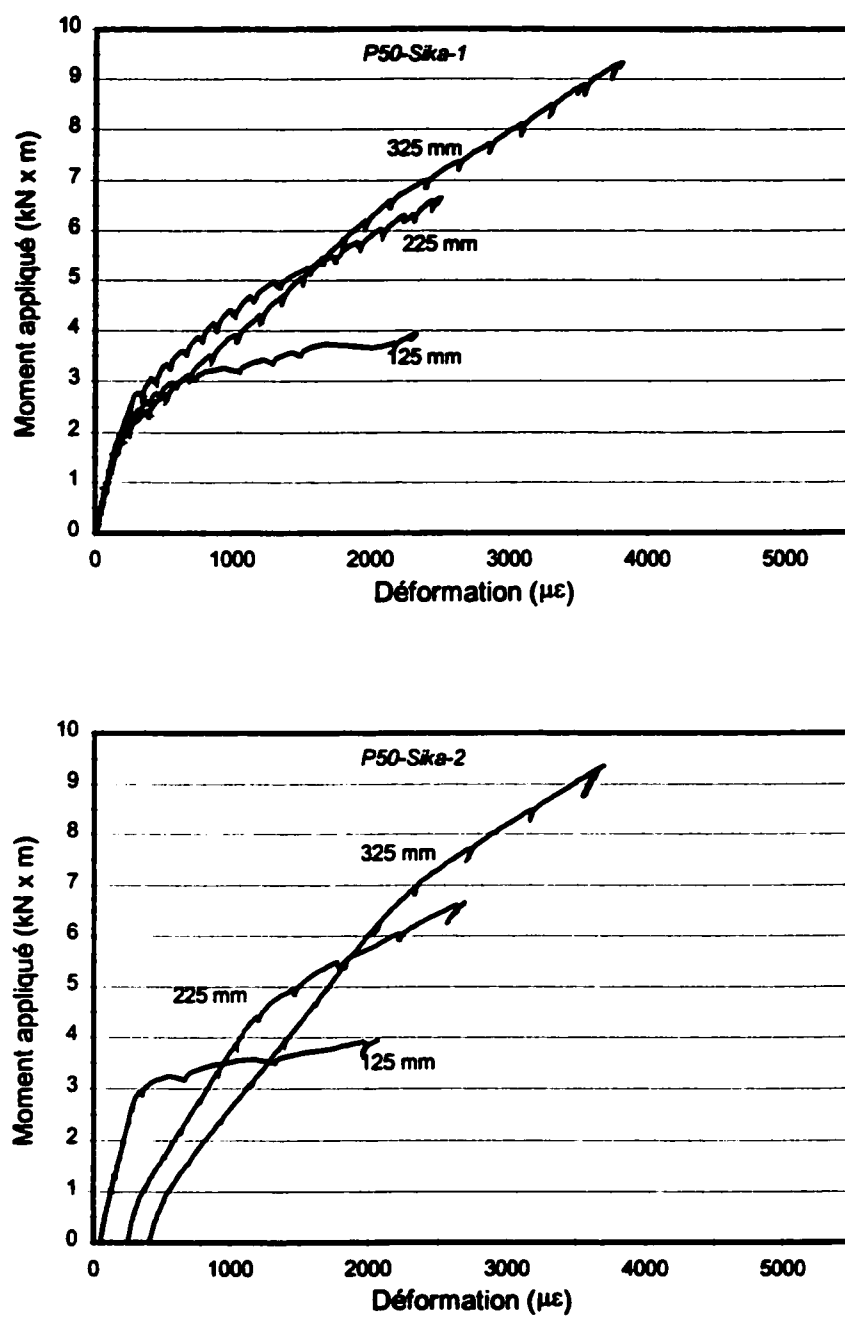


Figure D.7 - Moment appliqué et déformations du Carbodur S sur les poutres après 50 cycles de gel-dégel

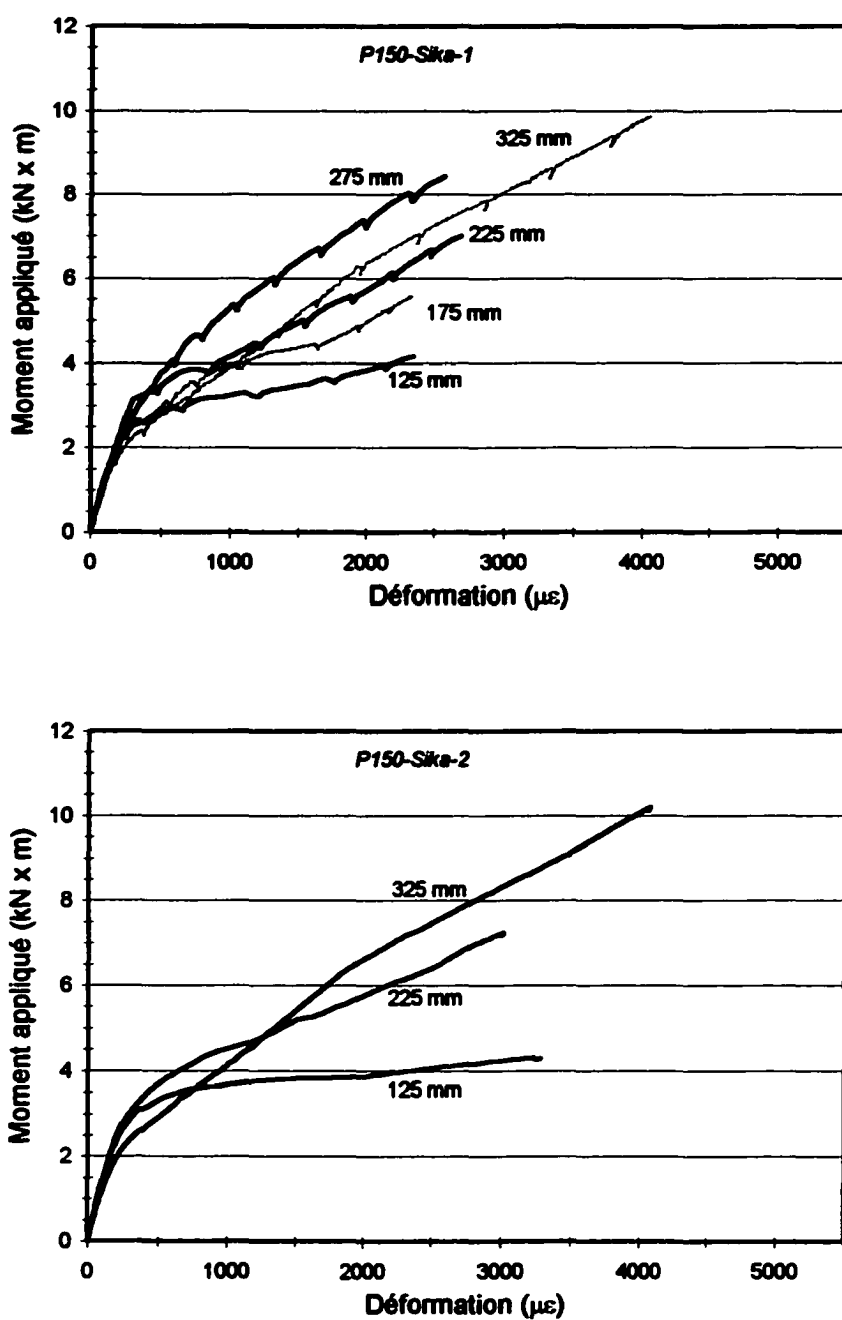


Figure D.8 - Moment appliqué et déformations du Carbodur S sur les poutres après 150 cycles de gel-dégel

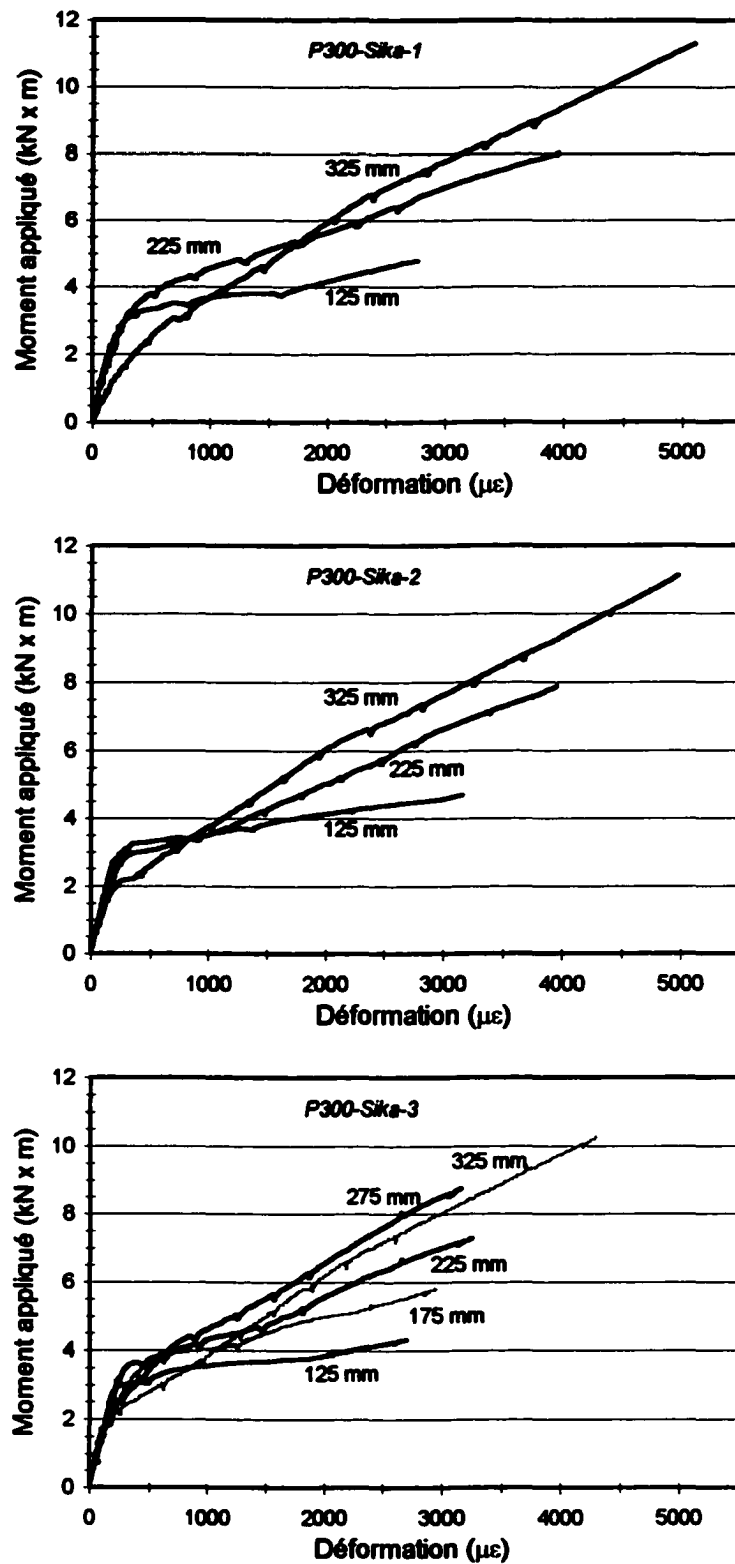


Figure D.9 - Moment appliqué et déformations du Carbodur S sur les poutres après 300 cycles de gel-dégel

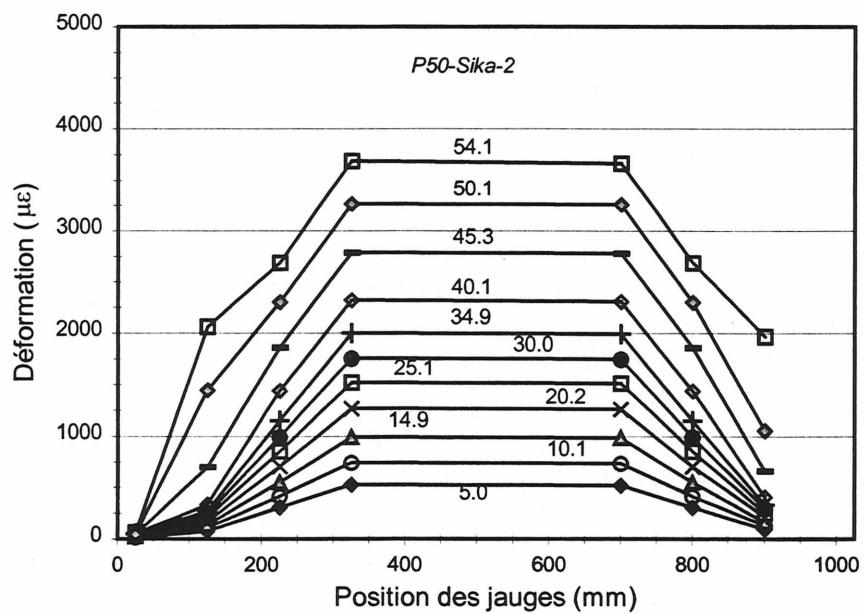
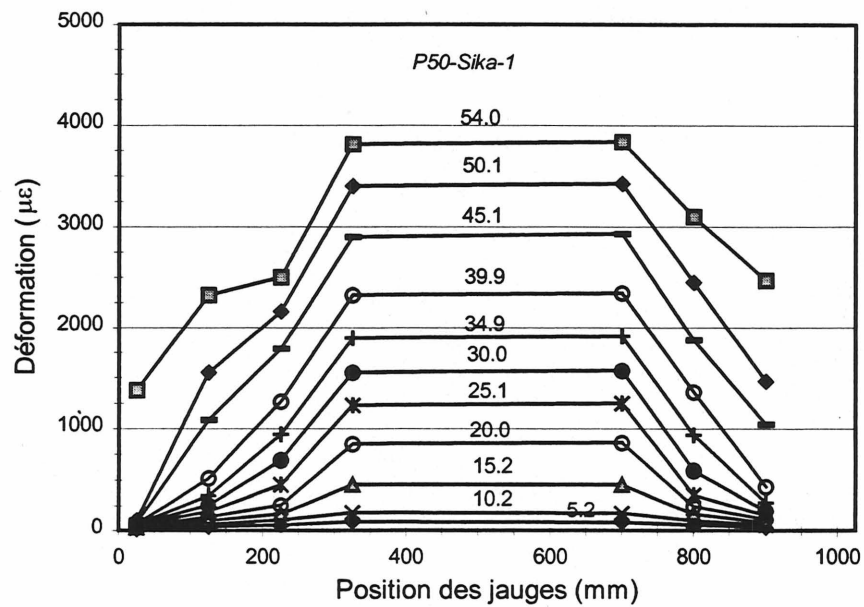


Figure D.10 - Profil des déformations le long du Carbodur S pour les poutres après 50 cycles de gel-dégel en fonction de la charge appliquée

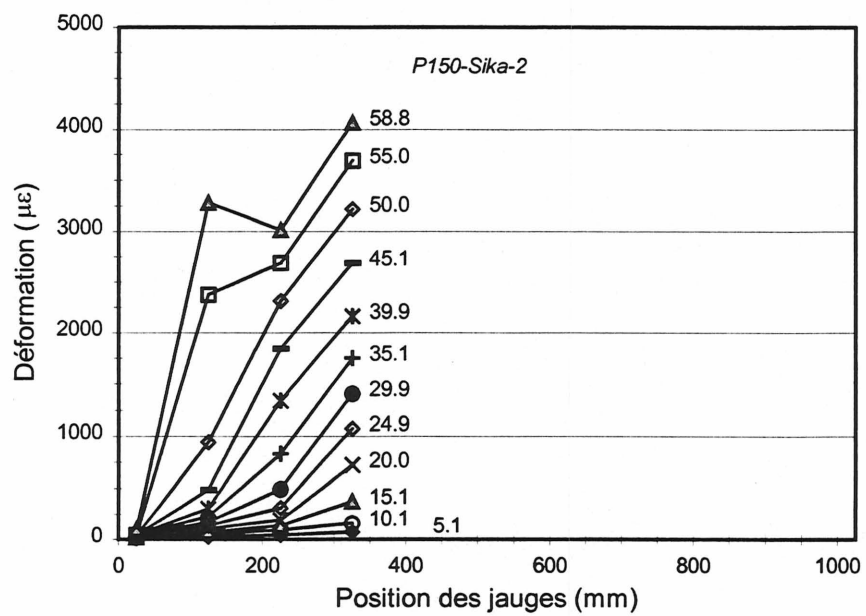
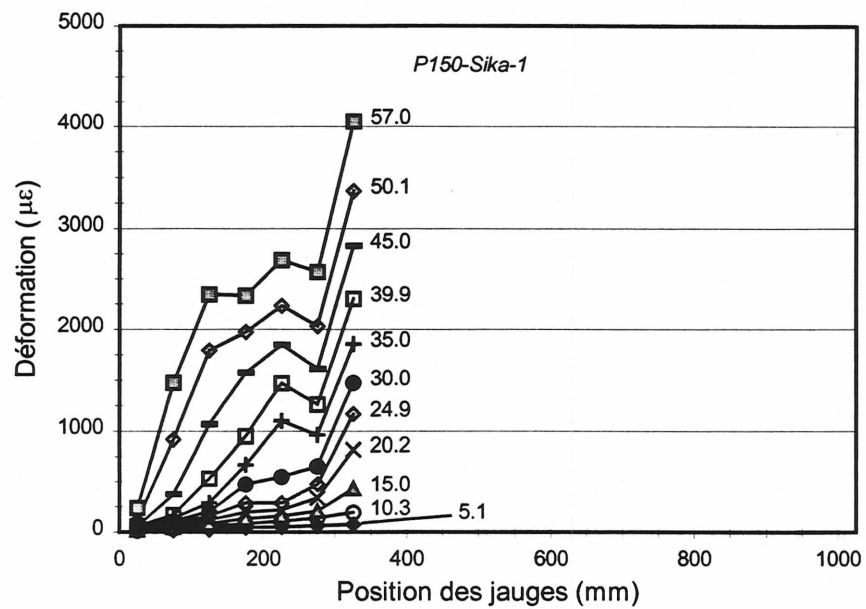


Figure D.11 - Profil des déformations le long du Carbodur S pour les poutres après 150 cycles de gel-dégel en fonction de la charge appliquée

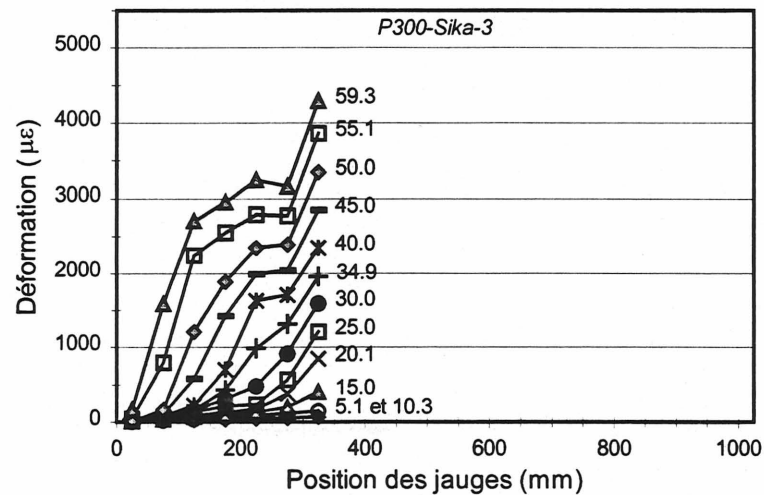
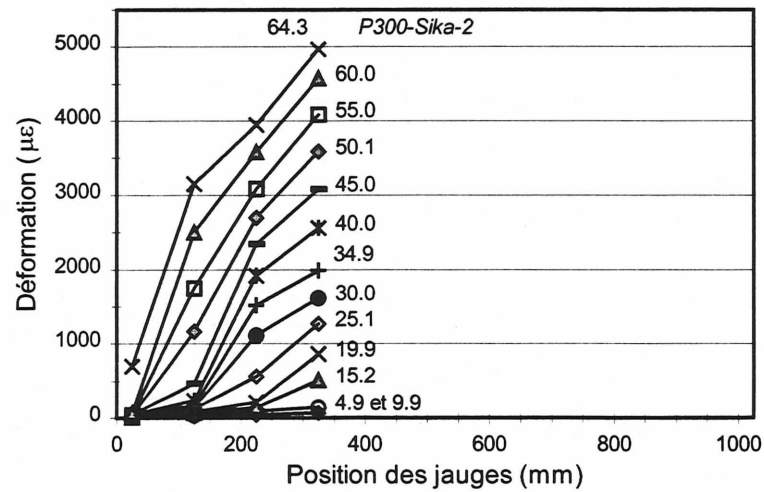
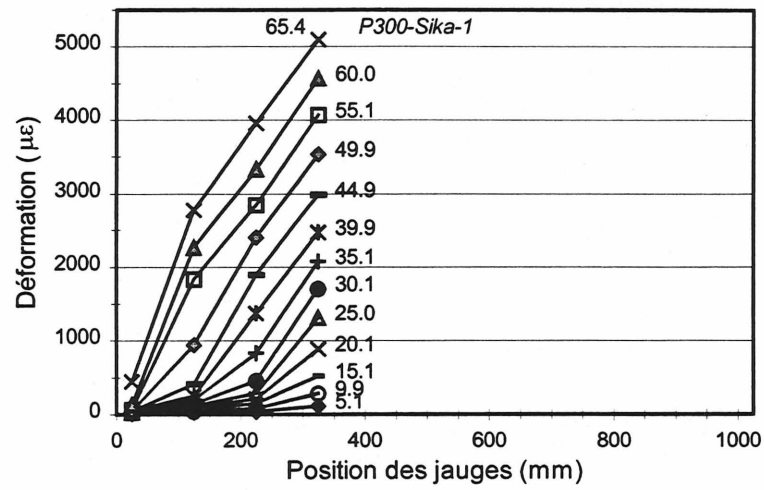


Figure D.12 - Profil des déformations le long du Carbodur S pour les poutres après 300 cycles de gel-dégel en fonction de la charge appliquée

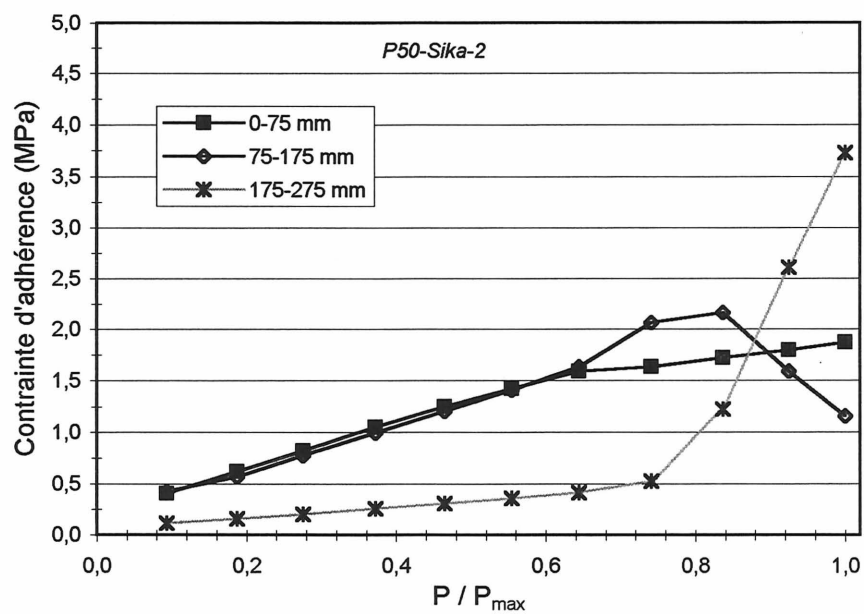
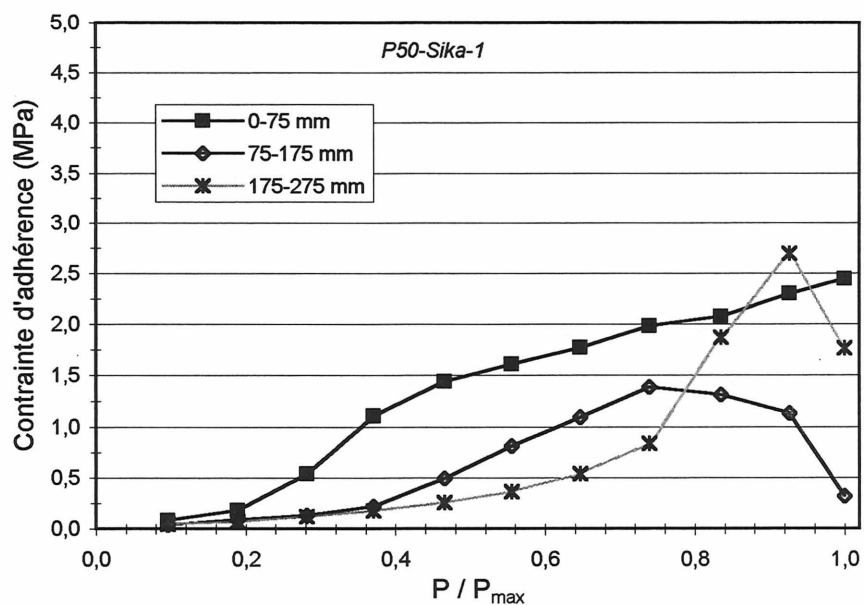


Figure D.13 - Contrainte d'adhérence en fonction du niveau relatif du chargement des poutres avec le Carbodur S après 50 cycles de gel-dégel

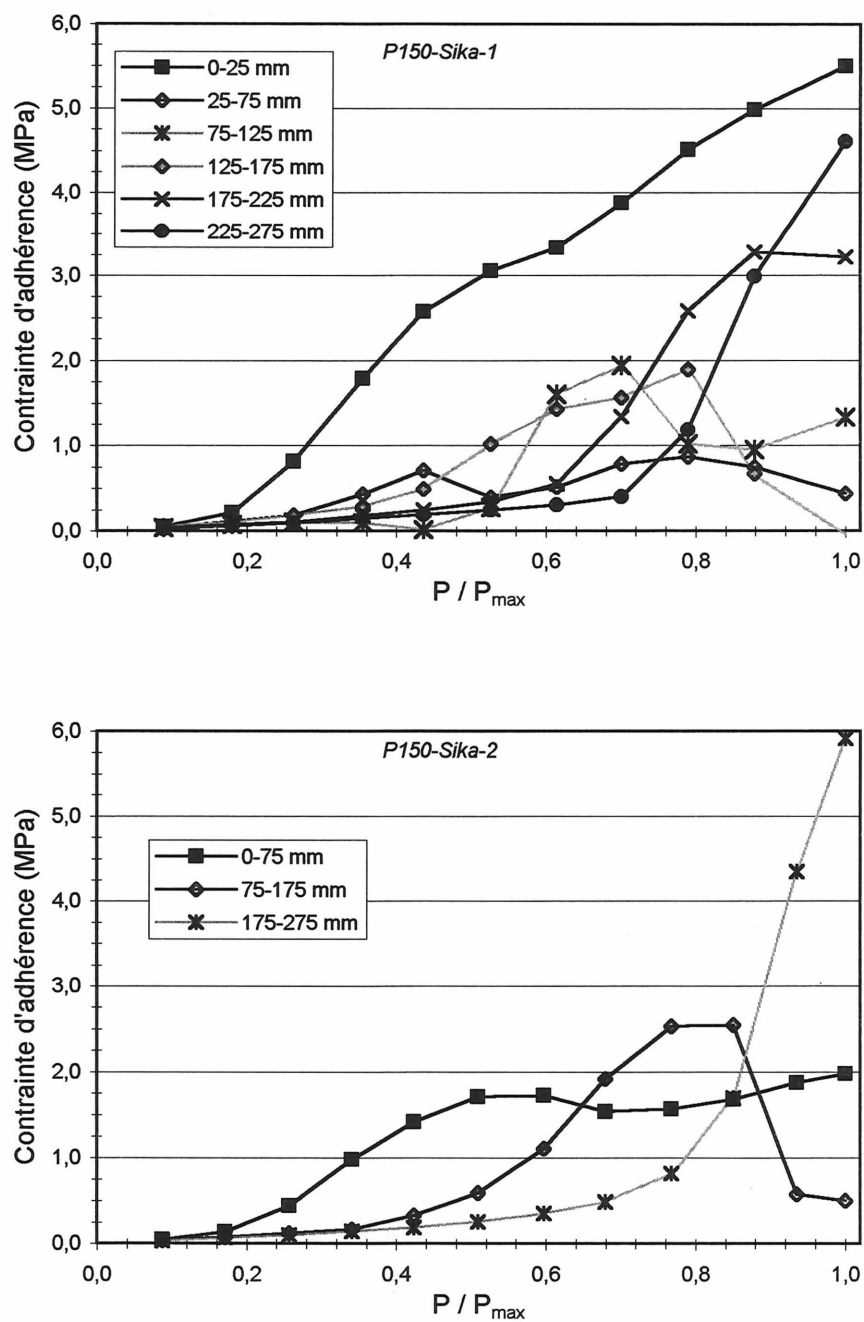


Figure D.14 - Contrainte d'adhérence en fonction du niveau relatif du chargement des poutres avec le Carbodur S après 150 cycles de gel-dégel

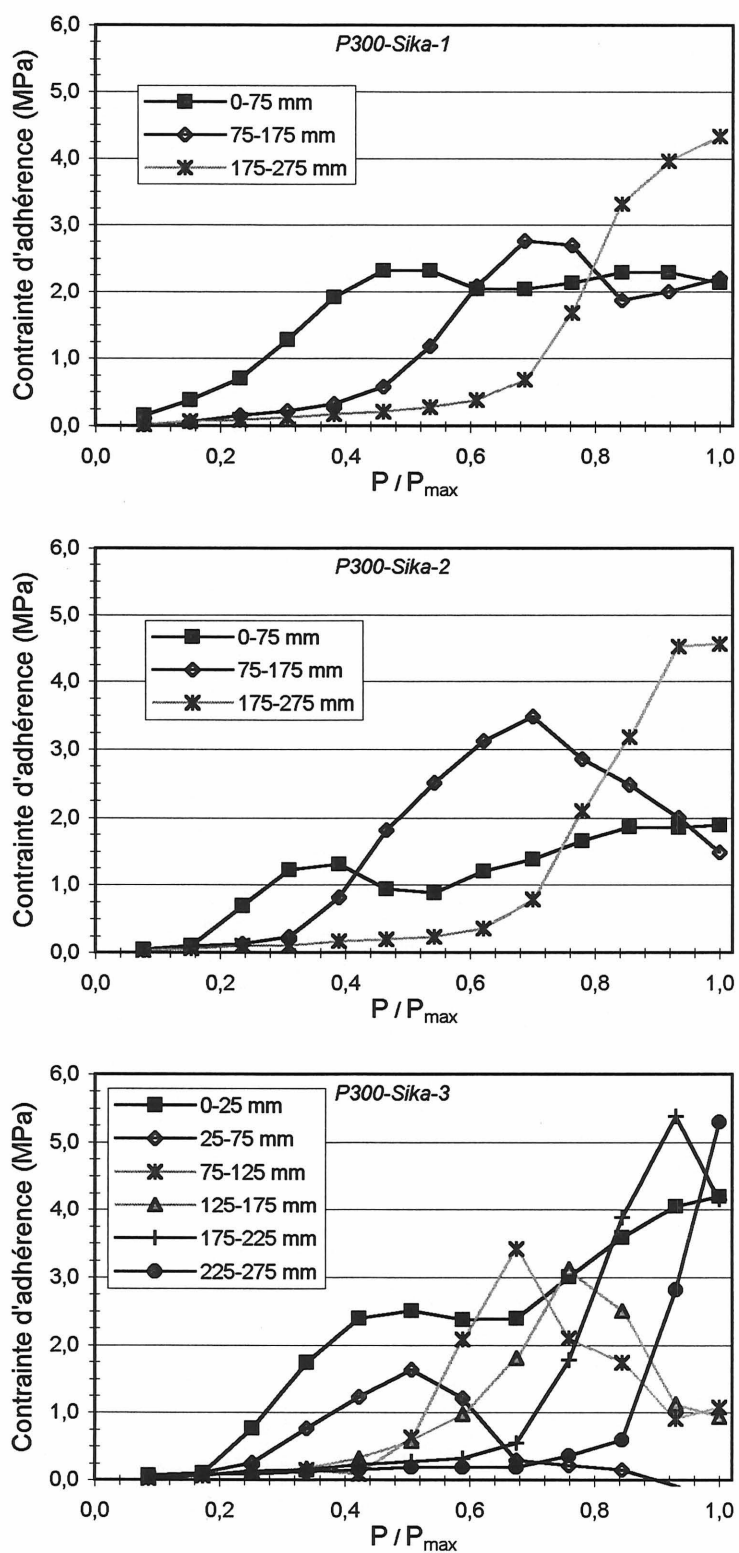


Figure D.15 - Contraite d'adhérence en fonction du niveau relatif du chargement des poutres avec le Carbodur S après 300 cycles de gel-dégel

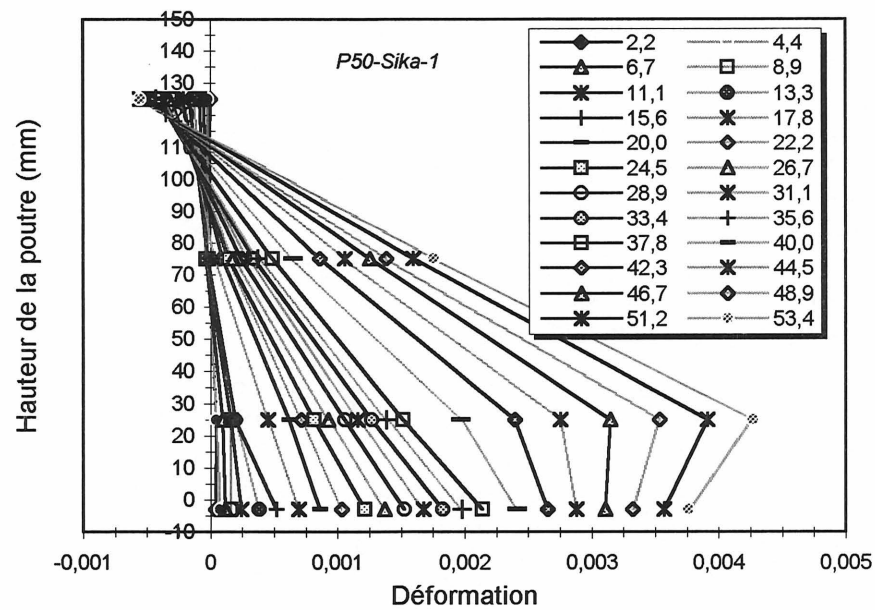
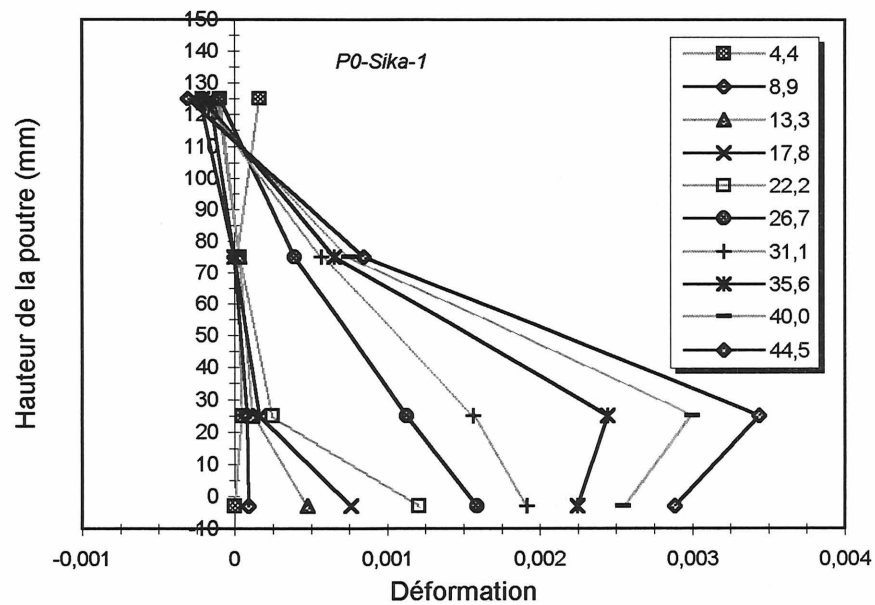


Figure D.16 - Position de l'axe neutre des poutres de contrôle et après 50 cycles de gel-dégel

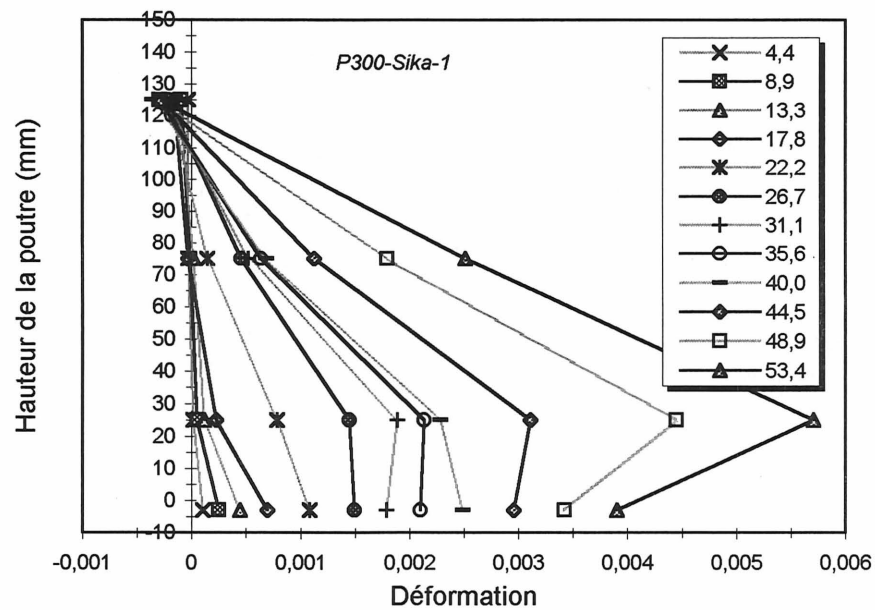
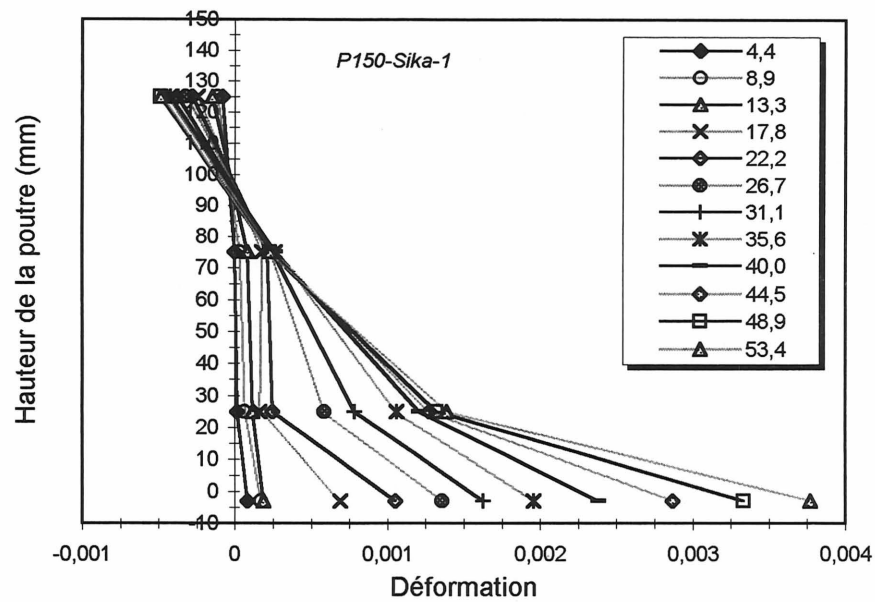


Figure D.17 - Position de l'axe neutre des poutres après 150 et 300 cycles de gel-dégel

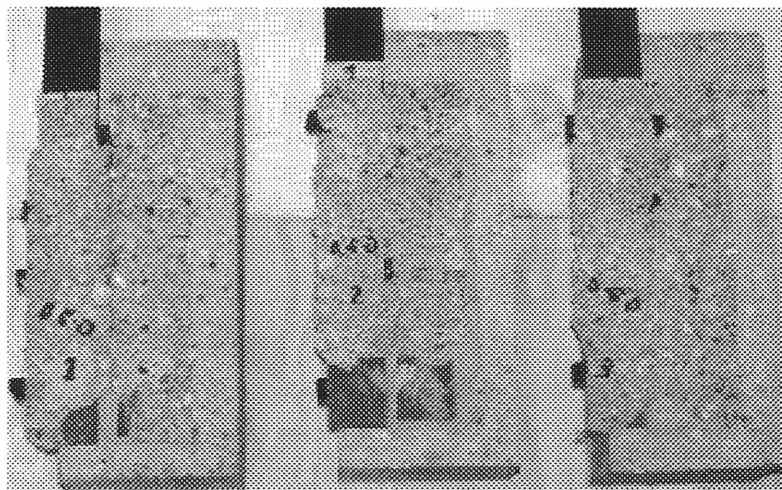


Figure D.18 - Mode de rupture des blocs de contrôle

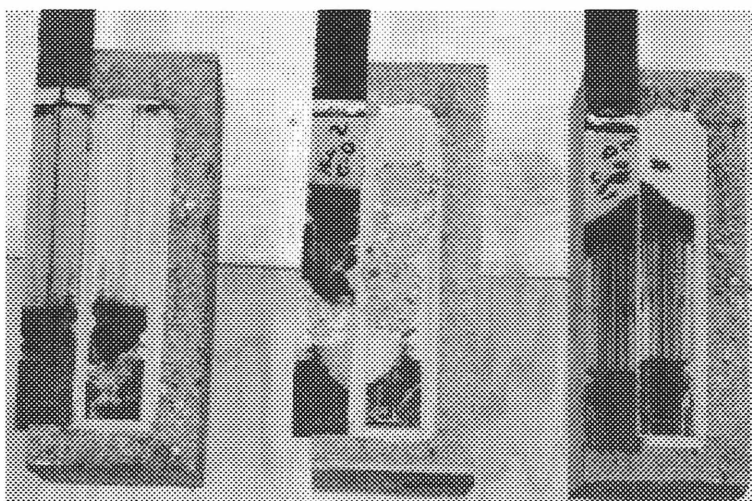
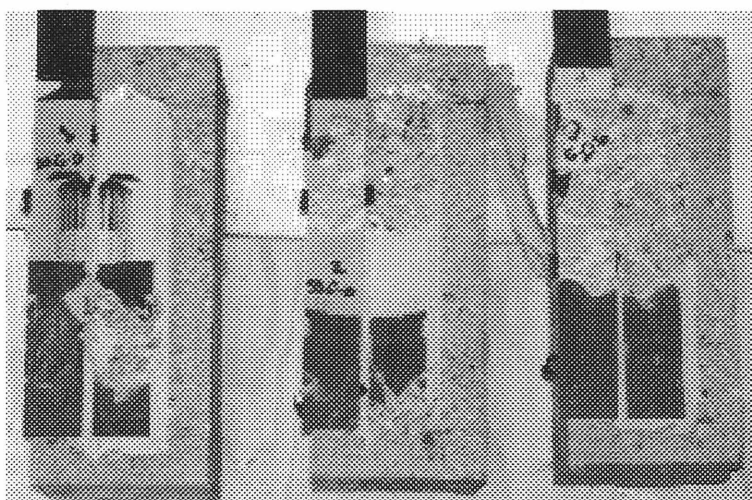


Figure D.19 - Mode de rupture des blocs après des cycles de gel-dégel (50 et 150 cycles)

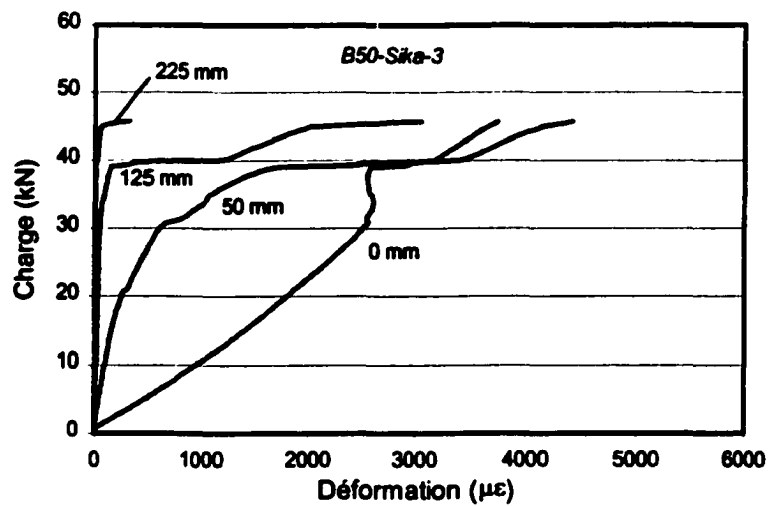
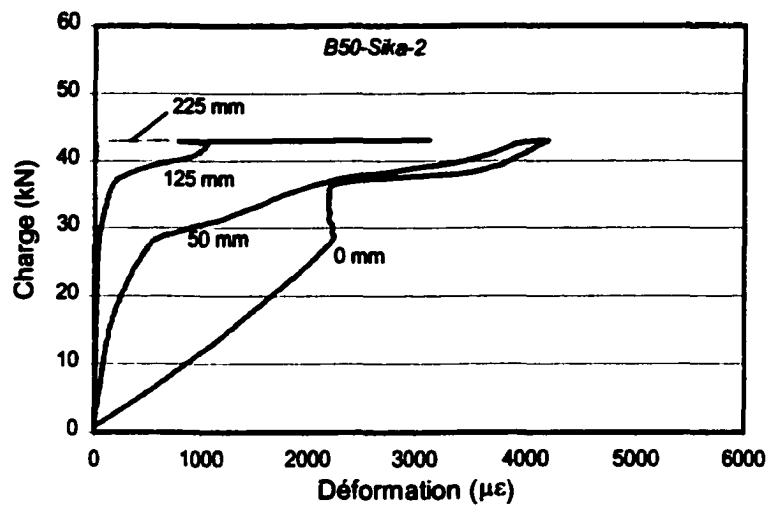
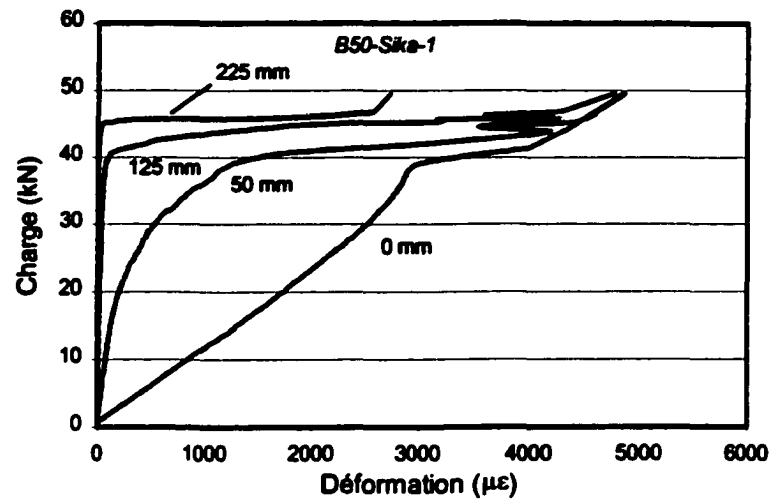


Figure D.20 - Charge appliquée et déformations du Carbodur S pour les blocs après 50 cycles

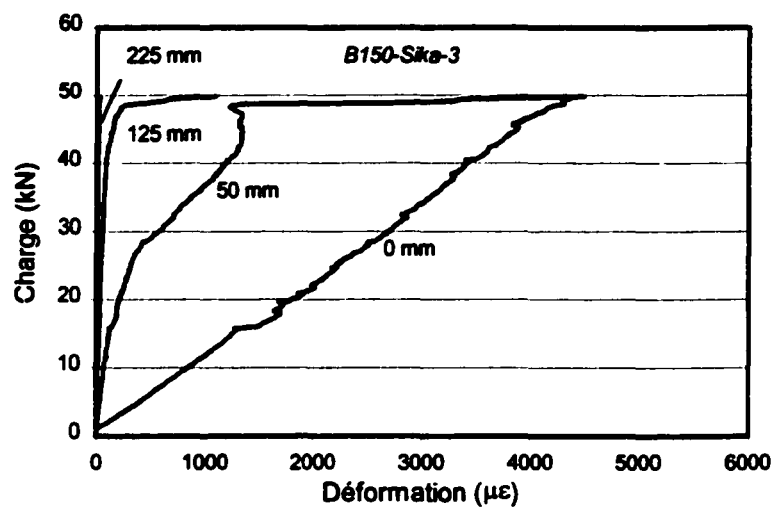
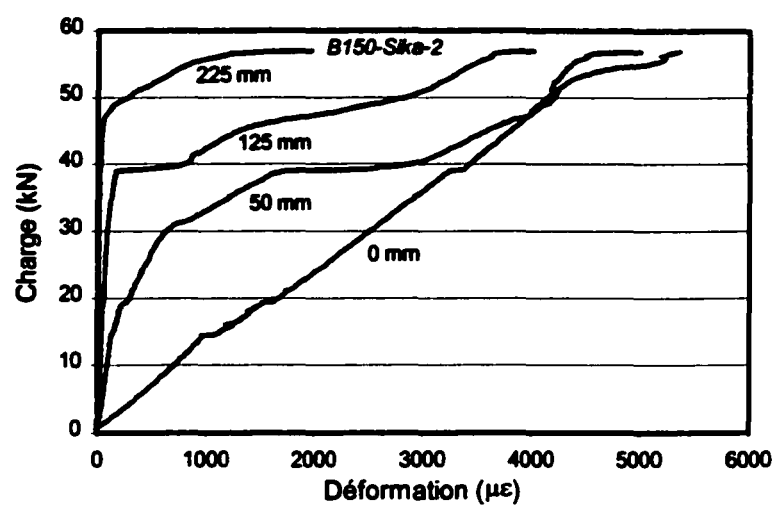


Figure D.21 - Charge appliquée et déformations du Carbodur S pour les blocs après 150 cycles

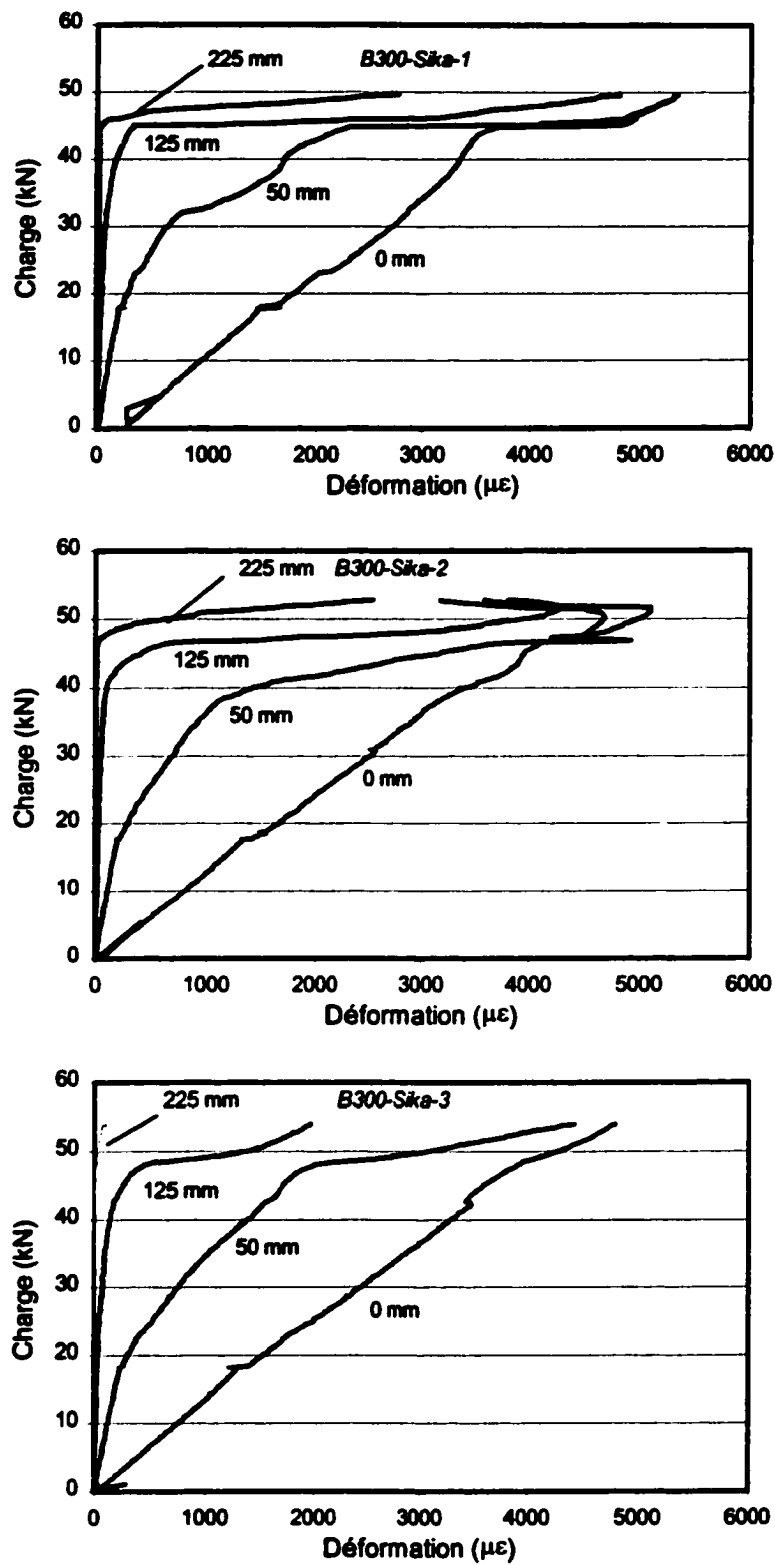


Figure D.22 - Charge appliquée et déformations du Carbodur S pour les blocs après 300 cycles

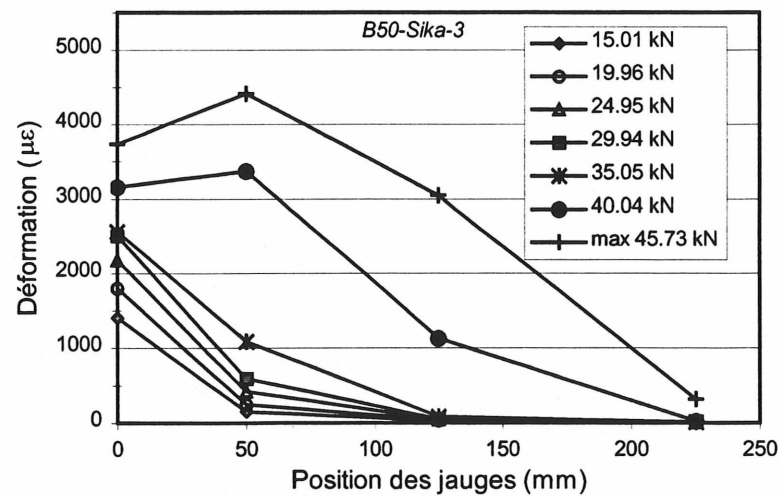
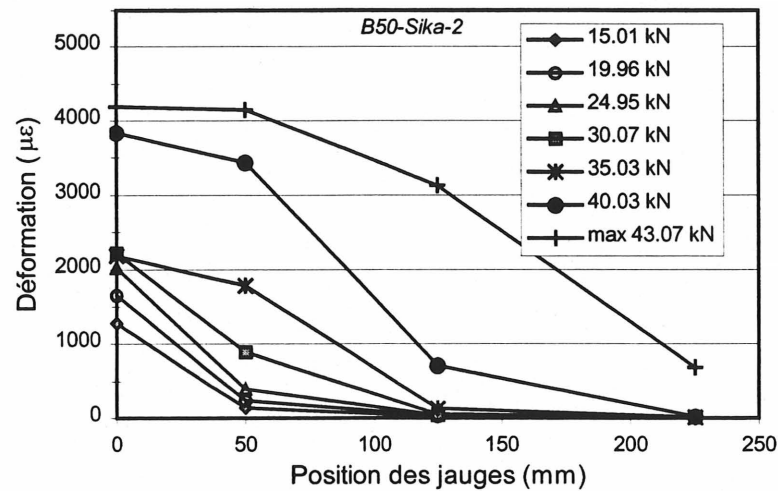
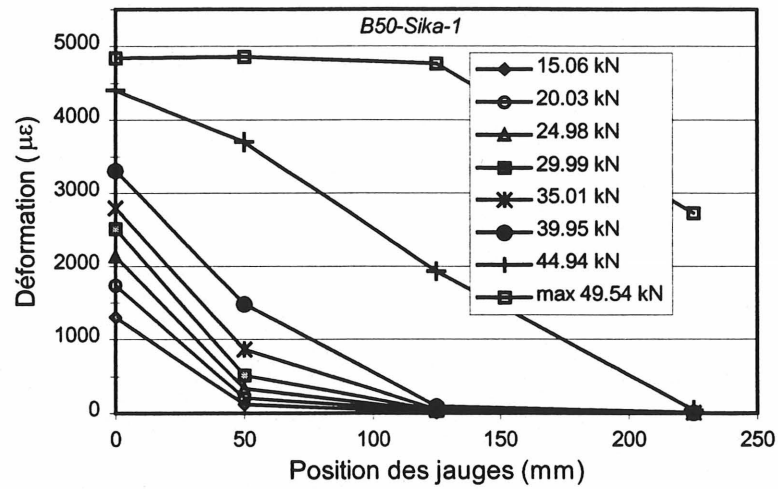


Figure D.23 - Profil des déformations le long du Carbodur S pour les blocs après 50 cycles de gel-dégel en fonction de la charge appliquée

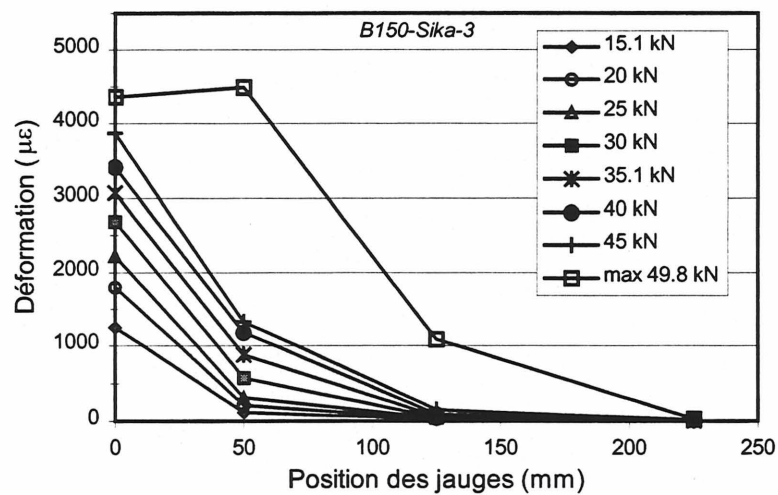
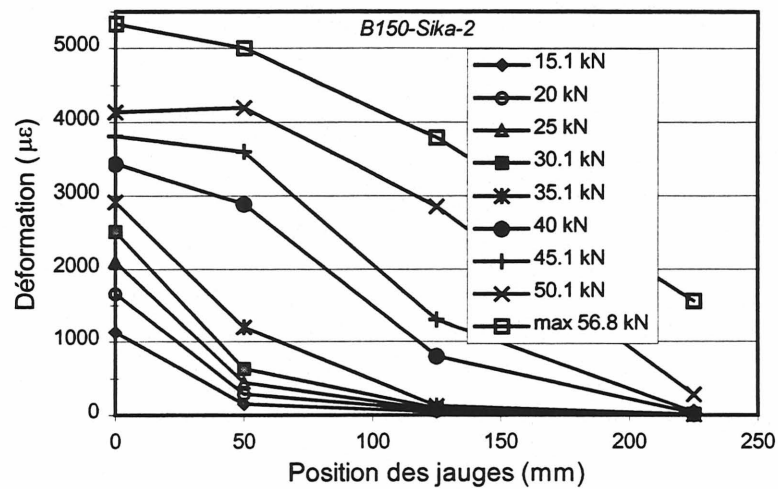


Figure D.24 - Profil des déformations le long du Carbodur S pour les blocs après 150 cycles de gel-dégel en fonction de la charge appliquée

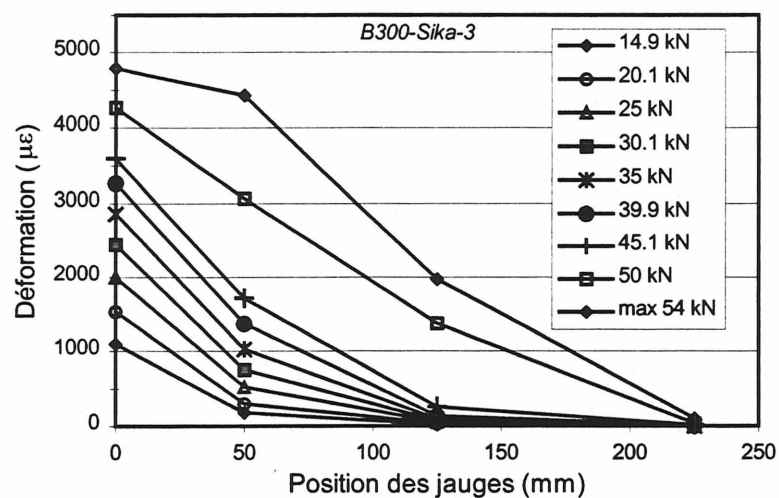
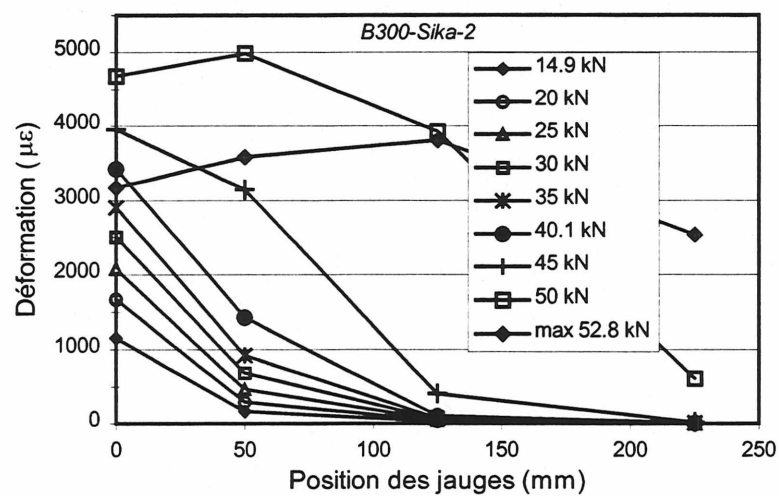
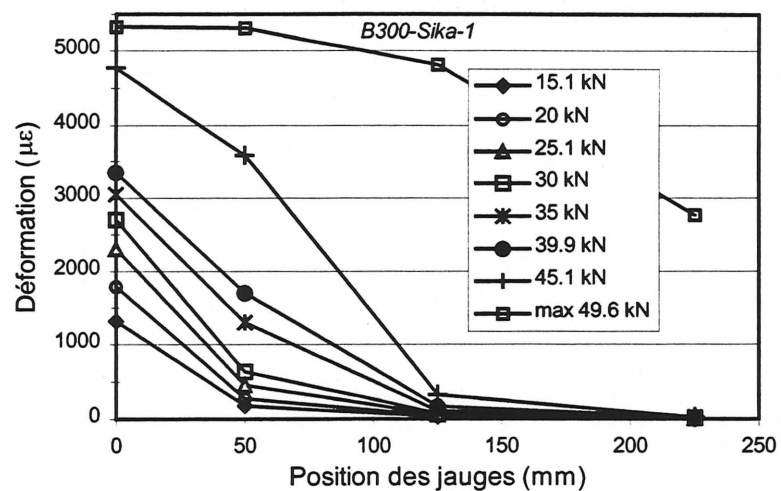


Figure D.25 - Profil des déformations le long du Carبودر S pour les blocs après 300 cycles de gel-dégel en fonction de la charge appliquée

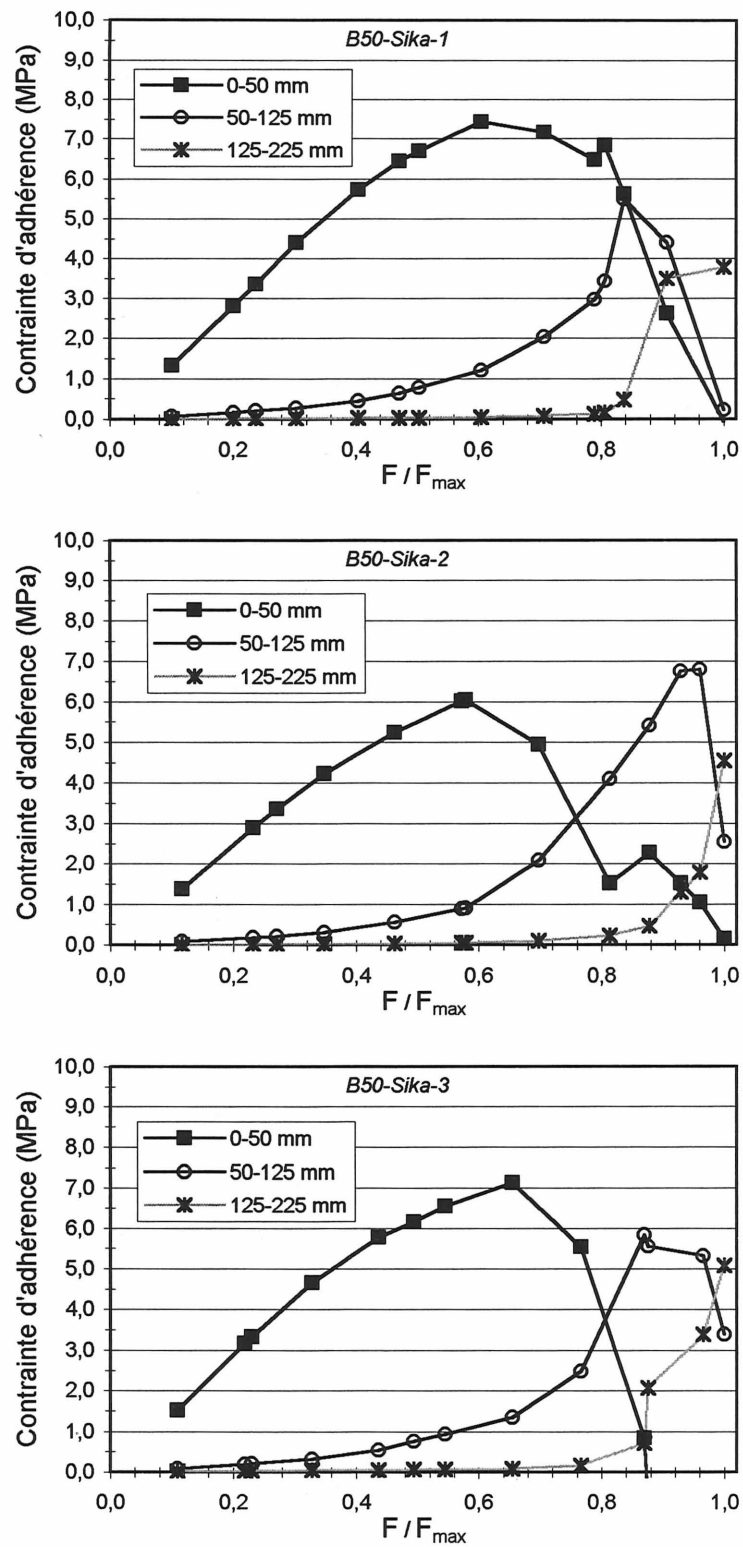


Figure D.26 - Contrainte d'adhérence en fonction du niveau relatif du chargement des blocs avec le Carbodur S après 50 cycles de gel-dégel

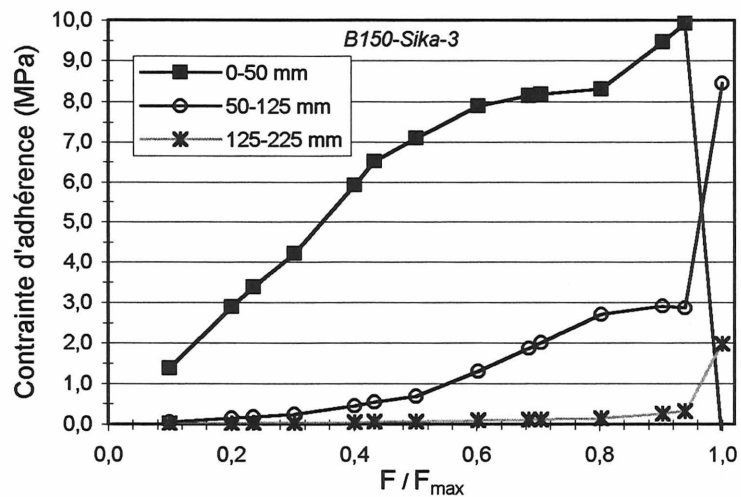
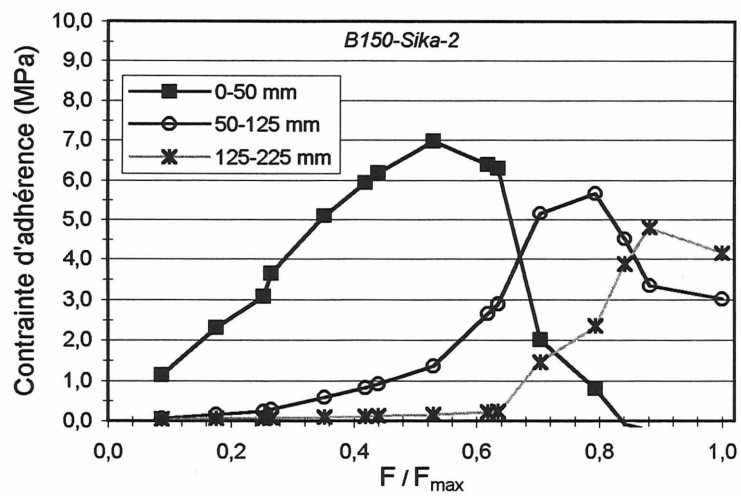


Figure D.27 - Contraite d'adhérence en fonction du niveau relatif du chargement des blocs avec le Carbodur S après 150 cycles de gel-dégel

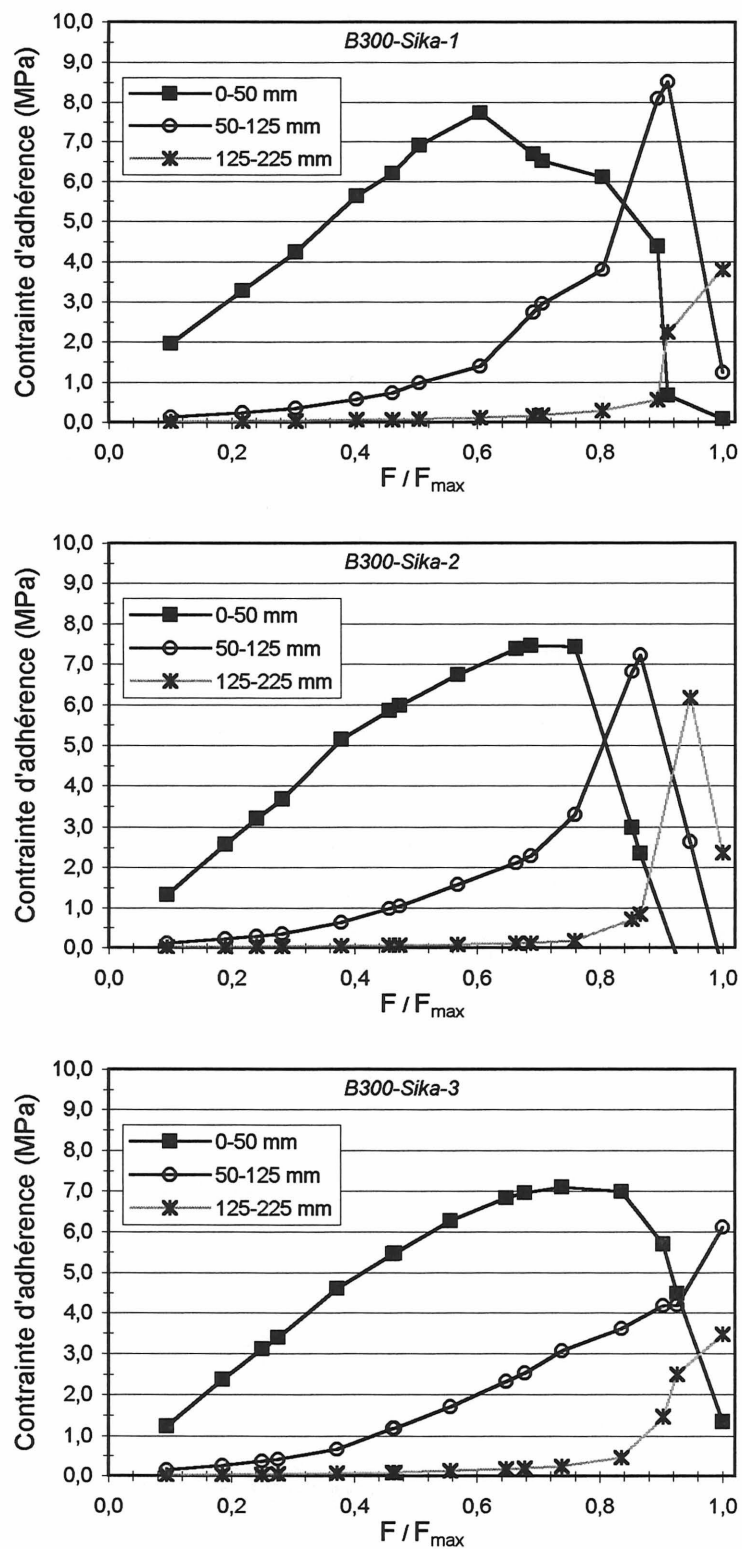


Figure D.28 - Contrainte d'adhérence en fonction du niveau relatif du chargement des blocs avec le Carbodur S après 300 cycles de gel-dégel

BIBLIOGRAPHIE

ACI COMMITTEE 440 (1996). *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures, Rapport ACI 440R-96 : American Concrete Institute, Detroit, 68 p.*

ADITYA, P.K. et SINHA, P.K. (1992). Diffusion Coefficients of Polymeric Composites Subjected to Periodic Hygrothermal Exposure, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **11**, 1035–1047.

AGARWAL, B.D. et BROUTMAN, L.J. (1980). *Analysis and Performance of Fiber Composites*, John Wiley & Sons, 355 p.

ASTM C666 (1995). Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, *Annual Book of ASTM Standards*, 320–324.

ASTM C672 (1995). Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals, *Annual Book of ASTM Standards*, 339–341.

ASTM D618 (1995). Standard Test Method for Conditioning Plastics and Electrical Insulating Materials for Testing, *Annual Book of ASTM Standards*, 36–38.

ASTM D3039 (1995). Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, *Annual Book of ASTM Standards*, **15.03**, 111–121.

BANK, L.C., GENTRY, R.T. et BARKATT, A. (1995). Accelerated Test Methods to Determine the Long-Term Behavior of FRP Composite Structures: Environmental Effects, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **14**, 559–587.

BANTHIA, N. et MACDONALD, R. (s.d.). Durability of Fiber-Reinforced Plastics and Concretes, Part 1 : Durability of Components, submitted to *ACMBS Network of Canada*, 25 p.

BAUMERT, M.E., GREEN, M.F. et ERKI, M.-A. (1996). Low Temperature Behaviour of Concrete Beams Strengthened with FRP Sheets, *Proceeding of the 1996 CSCE Annual Conference*, Edmonton, 179–190.

BAUMERT, M.E., GREEN, M.F. et ERKI, M.-A. (1996). A Review of Low Temperature Response of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Sheets, *Compte rendu de MCAPC-2*, M.M. El-Badry, éditeur, Société canadienne de génie civil, Montréal, 565–572.

BIZINDAVYI, L. et NEALE, K.W. (1997). Experimental and Theoretical Investigation of Transfer Lengths for Composite Laminates Bonded to Concrete, *Compte rendu du Congrès annuel de 1997 de la Société canadienne de génie civil*, Sherbrooke, 51–60.

BIZINDAVYI, L. et NEALE, K.W. (1999). Transfer Lengths and Bond Strengths for Composite Laminates Bonded to Concrete, *Journal of Composites for Construction (ASCE)*, (sous presse).

BLIKSTAD, M., SJOBLUM P.O.W. et JOHANNESSON, T.R. (1984). Long-Term Moisture Absorption in Graphite/Epoxy Angle-Ply Laminates, *Journal of Composite Materials*, 18, 32–46.

CHAJES, M.J., THOMSON, Jr.T.A. et FARSCHMAN, C.A. (1995). Durability of Concrete Beams Externally Reinforced with Composite Fabrics, *Construction and Building Materials*, 9(3), 141–148.

CIRISCIOLI, P.R., LEE, W.I., PETERSON, D.G., SPRINGER, G.S et TANG, J.-M. (1987). Accelerated Environmental Testing of Composites, *Journal of Composite Materials*, 21, 225–242.

EL-BADRY, M., éditeur (1996). Matériaux composites d'avant-garde pour ponts et charpentes : MCAPC-2, Société canadienne de génie civil, Montréal, 1027 p.

FILIATRAULT, A., HOLLERAN, M. et MASSICOTTE, B. (1997). Comportement sismique des piliers de ponts en béton armé en conditions hivernales au Québec, *4^e Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art*, Université Laval, Sainte-Foy, Québec.

FYFE, E.R., WATSON, R.J. et WATSON, S.C. (1996). Long Term Durability of Composites Based on Field Performance and Laboratory Testing, *Proceedings, First International Conference on Composites in Infrastructure (ICCI'96)*, Tucson, Arizona, 982–995.

GILSTRAP, J.M., BURKE, C.R., DOWDEN, D.M. et DOLAN, C.W. (1997). Development of FRP Reinforcement Guidelines for Prestressed Concrete Structures, *Journal of Composites for Construction*, 1(4), 131–139.

GOMEZ, J. et CASTO, B. (1996). Freeze-Thaw Durability of Composite Materials, *Proceedings, First International Conference on Composites in Infrastructure (ICCI'96)*, Tucson, Arizona, 947–955.

GREEN, M.F. et SOUDKI, K.A. (1997). FRP Strengthened Concrete Structures in Cold Regions, *Proceedings, Recent Advances in Bridge Engineering*, Zurich, 219–226.

GREEN, M.F., SOUDKI, K.A. et JOHNSON, M.M. (1997). Freeze-Thaw Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Fibre Reinforced Plastic Sheets, *Compte rendu du Congrès annuel de 1997 de la Société canadienne de génie civil*, Sherbrooke, 6, 31–39.

HARPER, J.F. et NAEEM, M. (1984). The Effect of Temperature and Humidity on Glass Fibre Reinforced Vinyl Ester Resin, *14th Reinforced Plastic Congress*, 173–176.

HORINO, T., MAEKAWA, Z. et HAMADA, H. (1987). Accelerated Aging of FRP in Hot-Water by Ultrasonic Vibration Technique, *ICM & ECCM*, 4, 4.212–4.221.

JAPAN CONCRETE INSTITUTE (1997). Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, *Proceedings of the 3rd International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Sapporo, 1, 723 p.

JAPAN CONCRETE INSTITUTE (1997). Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, *Proceedings of the 3rd International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Sapporo, 2, 813 p.

KARBHARI, V.M. et ECKEL, D.A. (1995). Effects of Short-Term Environmental Exposure on Axial Strengthening Capacity of Composite Jacketed Concrete, *Journal of Composites Technology & Research*, 17(2), 99–106.

KARBHARI, V.M. et ENGINEER, M. (1996). Effect of Environmental Exposure on the External Strengthening of Concrete with Composites – Short Term Bond Durability, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 15, 1194–1216.

KARBHARI, V.M. et SEIBLE, F. (1997). Durability and Systems Level Design Guidelines for the Use of Fiber Reinforced Composite Reinforcement in Civil Infrastructure, *Proceedings of the 3rd International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Sapporo, 2, 191–198.

LABOSSIERE, P. (1993). Applications présentes et futures des matériaux composites d'avant-garde en structures, *Réseau MCAPC du Canada*, Société canadienne de génie civil, 43 p.

LABOSSIERE, P., NEALE, K.W. et MARTEL, S. (1997). Strengthening of Existing Structures with Composite Materials : Practical Applications in Québec, *Recent Advances in Bridge Engineering*, Zurich, 89–96

LAMOTHE, P. (1999). Essai de renforcement avec des matériaux composites pour des poutres de ponts en béton armé, *Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées*, Université de Sherbrooke, Sherbrooke.

LAPIERRE, P. (1999). Modélisation de poutres en béton armé renforcées avec des matériaux composites, *Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées*, Université de Sherbrooke, Sherbrooke.

LAVERGNE, S. (1998). Étude expérimentale de poteaux en béton armé confinés par une enveloppe en matériaux composites, *Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées*, Université de Sherbrooke, Sherbrooke.

LORD, H.W. et DUTTA, P.K. (1988). On the Design of Polymeric Structures for Cold Regions Applications, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 7, 435–458.

MCMANUS, H.L., BOWLES, D.E. et TOMPKINS, S.S. (1996). Prediction of Thermal Cycling Induced Matrix Cracking, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 15, 124–140.

- MEIER, U. et BETTI, R., éditeurs (1997). *Recent Advances in Bridge Engineering*, Zurich, 424 p.
- MENGES, G. et GITSCHNER, H.-W. (1980). Sorption Behaviour of Glass-Fibre Reinforced Composites and The Influence of Diffusing Media on Deformation and Failure Behaviour, *Proceedings of 3rd International Conference on Composite Materials*, Paris, 25–48.
- MONTGOMERY, D.C. (1997). *Design and Analysis of Experiments*, 4^e édition, John Wiley & Sons, 704 p.
- MUFTI, A.A., ERKI, M.-A. et JAEGER, L.G., éditeurs (1991). *Advanced Composite Materials with Application to Bridges*, Canadian Society for Civil Engineering, 297 p.
- MUFTI, A.A., ERKI, M.-A. et JAEGER, L.G., éditeurs (1992). *Advanced Composite Materials in Bridges and Structures in Japan*, Canadian Society for Civil Engineering, 172 p.
- NANNI, A., éditeur (1993). *Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures : Properties and Applications*, Elsevier, 450 p.
- NEALE, K.W. et LABOSSIERE, P., éditeurs (1992). *Matériaux composites d'avant-garde pour ponts et charpentes : MCAPC-1*, Société canadienne de génie civil, Sherbrooke, 705 p.
- SEIBLE, F., KARBHARI, V., BURGUEÑO, R., DAVOL, A. et WERNLI, M. (1997). Design Issues with Carbon Fiber Composite Reinforced Concrete Structures, *Proceedings of the 3rd International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Sapporo, 2, 89–112.
- SHEN, C.H. et SPRINGER, G.S. (1977). Environmental Effects on the Elastic Moduli of Composite Materials, *Journal of Composite Materials*, 11, 250–264.
- SPRINGER, G.S. (1988). *Environmental Effects on Composite Materials*, Technomic Publishing Company, Lancaster, 3, 498 p.
- SPRINGER, G.S. (1984). *Environmental Effects on Composite Materials*, Technomic Publishing Company, Lancaster, 2, 438 p.
- SPRINGER, G.S. (1981). *Environmental Effects on Composite Materials*, Technomic Publishing Company, Wesport, 1, 203 p.
- SONOBE, Y., FUKUYAMA, H., OKAMOTO, T., KANI, N., KIMURA, K., KOBAYASHI, K., MASUDA, Y., MATSUZAKI, Y., MOCHIZUKI, S., NAGASAKA, T., SHIMIZU, A., TANANO, H., TANIGAKI, M. et TESHIGAWARA, M. (1997). Design Guidelines of FRP Reinforced Concrete Building Structures, *Journal of Composites for Construction*, 1(3), 90–97.
- TOUTANJI, H. et BALAGURU, P. (1998). Durability Characteristics of Concrete Columns Wrapped with FRP Tow Sheets, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10(1), 52–57.

TOUTANJI, H.A. et GOMEZ, W. (1997). Durability Characteristics of Concrete Beams Externally Bonded with FRP Composite Sheets, *Cement and Concrete Composites*, 19, 351–358.

TSOTSIS, T.K. et LEE, S.M. (1997). Long-Term Durability of Carbon and Glass-Epoxy Composite Materials in Wet Environments, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 16(17), 1609–1621.

XIE, M., HOA, S.V. et XIAO, X.R. (1995). Bonding Steel Reinforced Concrete with Composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 14, 949–964.

YAGI, K., TANAKA, T., SAKAI, H. et OTAGURO, H. (1997). Durability of Carbon Fiber Sheet for Repair and Retrofitting, *Proceedings of the 3rd International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Sapporo, 2, 259–266.